

李庆忠文集

寻找油气的物探理论与方法

第三分册 争鸣篇

李庆忠 编著

构造圈闭

岩性圈闭

TRAP-3D



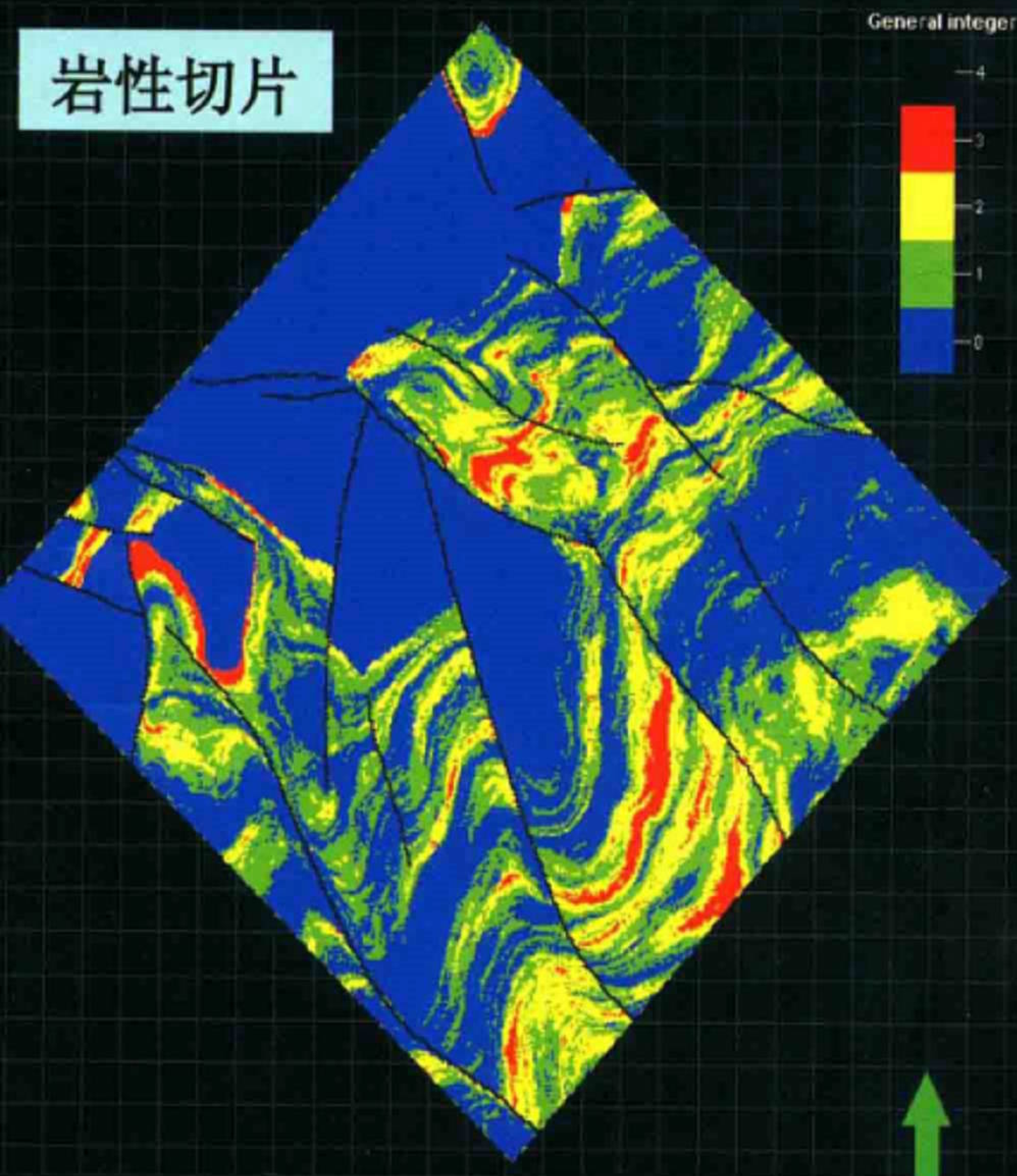
中国海洋大学出版社

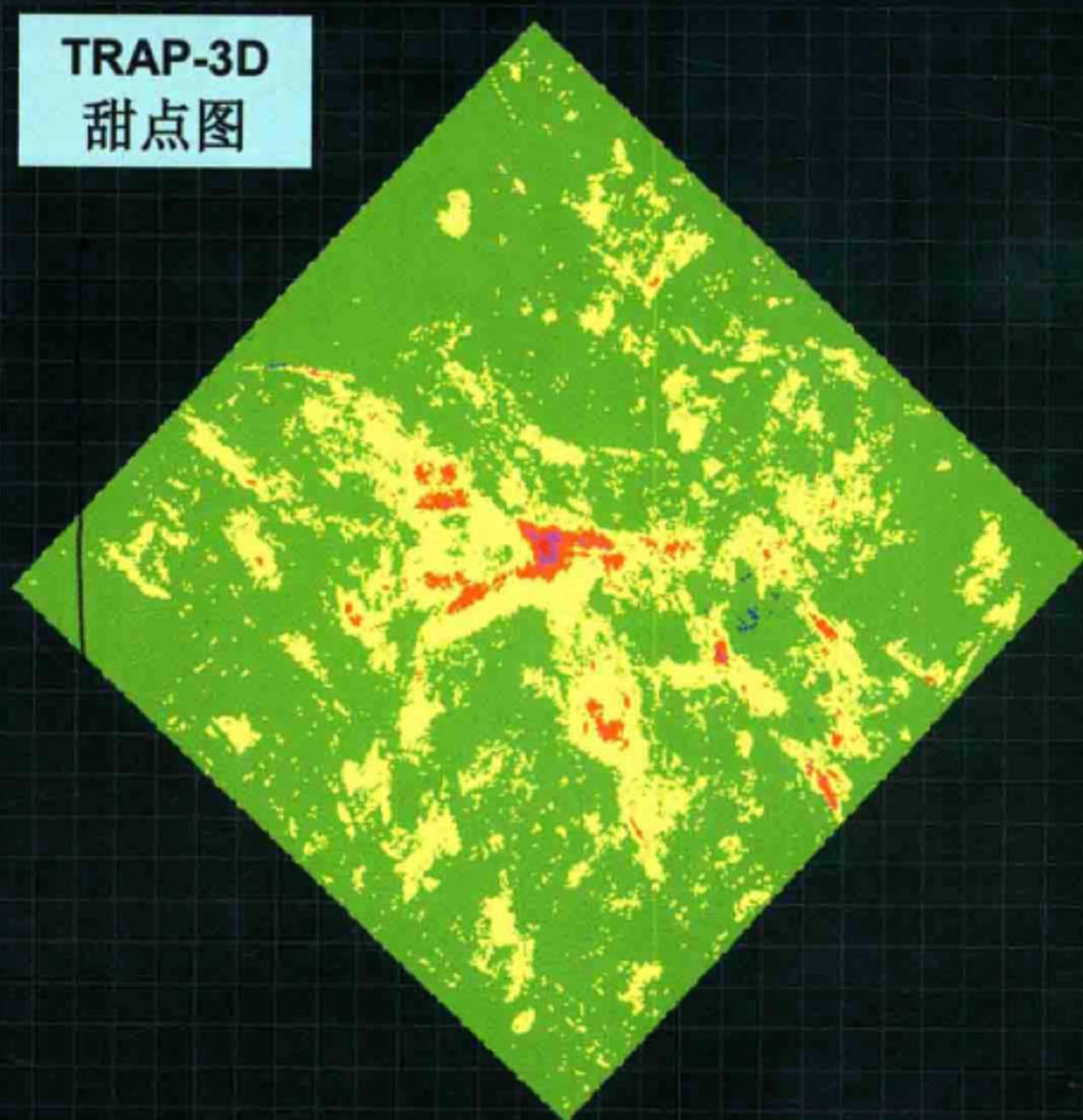


Selected Works of Li Qingzhong

Essential Theory and Method of Petroleum Geophysics

Volume Ⅲ Contending part





ISBN 978-7-5670-0754-3



责任编辑/张跃飞 封面设计/陈 龙 终 审/李学伦

定价：200.00元



李庆忠文集

寻找油气的物探理论与方法

第三分册 争鸣篇

李庆忠 编著



中国海洋大学出版社
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS

本文集汇集了李庆忠院士从事石油勘探工作以来的主要研究成果，是他60年来经验及体会的总结。文集针对地震基础理论、各种地震信息的利用及物探方法的改进诸方面都进行了深入的探讨和详细的阐述，相信能对物探技术的发展有重要的指导意义。

本文集适合从事石油勘探的人员阅读，也可作为大专院校地质及地球物理专业师生重要的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

寻找油气的物探理论与方法.第三分册，争鸣篇 / 李庆忠编著. —青岛：中国海洋大学出版社，2015.11

ISBN 978-7-5670-0754-3

Ⅰ.①寻… Ⅱ.①李… Ⅲ.①油气勘探—地球物理勘探—研究 Ⅳ.①P618.130.8

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第222848号

出版发行	中国海洋大学出版社		
社　　址	青岛市香港东路23号	**邮政编码**	266071
出 版 人	杨立敏		
网　　址	http://www.ouc-press.com		
电子信箱	flyleap@126.com		
订购电话	0532－82032573(传真)		
责任编辑	张跃飞	**电　　话**	0532－85901092
印　　刷	青岛国彩印刷有限公司		
版　　次	2015年12月第1版		
印　　次	2015年12月第1次印刷		
成品尺寸	210 mm×285 mm		
印　　张	28.5		
字　　数	874千		
定　　价	200.00元		



目录

Contents

全部三个分册的目录及大纲见第一分册，文集的“编者的话”及“自序”也可在第一分册里找到。

文章编号 301-1



对 Petro-Sonde 岩性探测技术的质疑



1984 年，美国地球物理国际公司创造出一个"黑匣子"，用耳朵听就能找油的方法，称为"岩性探测技术"。传到中国来之后，据报道他们能找油，找煤，还能找水。精度都很高。各油田相继请他们去找油，一时风靡全国。

于是，我国有 6 个单位相继能制造这种仪器。中国科学院地物所、清华大学电子工程系等单位还为它寻找理论依据。

在一片对 Petro-Sonde 的赞扬声中，我不信那个邪，顶风写了这篇争鸣文章，直指该方法是伪科学。

此文 1996 年 4 月发表于《石油地球物理勘探》第 2 期，作者李庆忠。

摘　要

Petro-Sonde 或称为岩性探测技术，其实质是接收时间域内电磁场中不稳定的脉动噪声。因此，其观测数据既无重复性、一致性，又无稳定性，不可能用它来了解地下的地质结构。本文从理论上对该方法的分辨率、穿透深度、目的层深度标定和时间域电磁信号的读数等问题进行了分析，又从实际数据的采集不合理性及解释中存在的主观随意性，提出了证据。最后认为该方法是不科学的，不可取的。

关键词

电磁勘探　电磁场　电磁干扰　岩性识别　分辨率　直接找油

引言

1984 年，美国地球物理国际公司(Geophysics International Corp.，简称 GI 公司)，声称发明了一种直接找油、找煤、找水的先进技术，称作"Petro-Sonde(中译为岩性探测)"方法。该法凭一种用耳朵来听的仪器(简称 PS 仪器)，能够听出在地下什么深度上有油。该仪器是一个"黑匣子"，不准别人打开。据称它是由太空技术发展而引入勘探的"高科技"。测量时，既不拉天线，也不埋设电极，仅凭"观测员"的耳朵，听来自地下电磁波的声音而作判断。

1985 年，该公司到任丘及胜利油田等地作"服务"。每到一处，公司人员先要进行"学习"。学习时要你首先告诉他这里油层有多深、有多厚，他听过以后，再到其他点上进行测量判断，并用手绘下他主观判断好坏的一种"曲线"，然后在室内进行"解释"。这种仪器只有 GI 公司来的两位先生会听，其他人听来只是一种"沙沙"声。这种试验的结果有的与实际不符，有的好像是很准。其实是这两位先生通过现场"学习"，

了解该区油层大致深度之后，“连蒙带猜”的结果。

当时国内有的人对 Petro-Sonde 作了片面的报道。报道中既不提上面所讲的“学习”过程，也不提失败的例子，只说它在任丘油田找油时，油层深度的误差小于 22 m；在开滦附近找煤时，煤层深度的误差小于 5 m，这实际上是一种误导。

我国已故地球物理学家顾功叙曾为此事写信到美国朋友处询问。大约在 1985 年秋，顾老在中国科学院地球物理研究所的会议室里，给我们念了一位美国科罗拉多矿业学院著名电法专家 G. Keller 的回信。信中说：“Petro-Sonde”不是什么“技术”，而是一种“魔术”，并且说该方法“没有任何理论依据”。我当时也不信这一套，因为我纳闷，为什么这样好的技术没有在美国引起轰动？为什么美国人自己不用它找油，而要到中国来介绍最先进的找油方法？

一、岩性探测仪是一个“黑匣子”

事隔两年，国内有一些人热衷于发展这项技术。例如浙江石油勘探处的陈维权、煤炭科学院地质勘探分院的王文祥等人都制造出用耳朵听的大地电场岩性探测仪。随后西安仪器厂的黄世矩和浙江的陈维权又制造出自动记录的仪器，用 PC-1500 计算机直接绘出曲线来，并相继传出他们的仪器在探测西藏地热水源及在各油田及煤田上找矿的“成功”消息。

他们的仪器和美国 GI 公司的一样，也是一个“黑匣子”，不准别人打开，也不拉天线、不接地线、不埋电极、不架磁棒。人们很难理解他们测量的是什么样的物理场。

据他们说(和 GI 公司说的一样)，他们测的是来自太阳风对地球磁场相互作用所产生的低频电磁波，透过地下，再反辐射到地表的波，而且称反辐射波的频率是地下岩性界面深度的函数。于是仪器上的旋钮拨到某一位置，就可以得到地下某一深度上的岩性反映。详细的原理他们说不清，于是都推说是“出于技术专利的原因”，不能相告。

1991 年，陈维权制造出 5 台 CYT-Ⅲ型大地电磁岩性探测仪，并分别在 5 个油田作直接找油试验。通过两年的试验，发现 5 台仪器基本上都没有“重复性”，即在同一个点上观测，在不同时间所得的曲线互相不一样。此外，把两台仪器放在同一个点上同时观测，两台仪器之间所得曲线也不同，即没有“一致性”。同一台仪器经陈维权前后不同调试后，性能又不一样，这叫做没有“稳定性”。笔者认为，既没有一致性，又没有重复性和稳定性的仪器是不能称之为“仪器”的。

然而，不可靠的东西有时往往也能勉强与地下某些现象偶然符合。这可以作如下理解：CYT 岩性测深曲线一般是左右跳个不停，解释油气层的标准又往往是随解释者而异，因此在油气层上下总能找到一些所谓的异常显示。再加上解释人员的主观随意性，更弄得活灵活现了。

其实，太阳风引起的电磁场，就是电法勘探中测量的“大地电磁场”。不过对于这种场，不埋不极化电极，不用高灵敏度的长磁棒是测不成的。因为要勘探的深度为数十米至数千米的地下目标，肯定要接收几千分之一赫兹到几千赫兹的电磁信号。这样的低频电磁信号肯定不能由现有的 CYT 仪器所接收。大概只有射频信号才能不拉天线，不接电极，而被短磁棒或线圈接收到。所以，我认为岩性探测仪实际上是工作于射频段的一只改装的收音机而已。它所测量的信号只能是收音机的噪声和天电的噪声，加上远方的雷电干扰脉动电磁波，根本不是从地下反辐射上来的电磁信号。

二、岩性探测在理论上难以置信

（一）岩性探测仪的分辨率不可能很高

大家知道，电磁波在真空中以光速传播，其波长极小，在空气中也如此。但是电磁波在地层中传播时，速度变得很低，波长变得特别大，电磁波在地层中的传播速度通常表示为：

$$V=\left(4\pi f\cdot\frac{\rho}{\mu}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

式中：f 为频率(Hz)；ρ 为地层电阻率(Ω·m)；μ 为磁导率(H/m)，岩石的磁导率一般等于 $4\pi\times10^{-7}$ H/m，H 表示亨利；V 为电磁波速度(km/s)。因此有：

$$V\approx(10\cdot f\cdot\rho)^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

故波长表示为

$$\lambda\approx(10\cdot\rho\cdot T)^{\frac{1}{2}} \tag{3}$$

式中：λ 为波长(km)；T 为周期(s)。[1]

沉积岩的电阻率一般变化范围为 5～50 Ω·m。现在假设工区中地层的平均电阻率 ρ 为 10 Ω·m，则其传播速度及波长如表 1 所列。

表 1 电磁波频率与速度、波长和分辨率的关系

频率 f/Hz	周期 T/s	速度 V/(km/s)	波长 λ/km	分辨率
0.0001	10000	0.1	1000	极低
0.01	100	1	100	太低
1	1	10	10	很低
100	0.01	100	1	低
10000	10^{-4}	1000	0.1	和地震勘探相当

注：在计算中，沉积岩平均电阻率 ρ 为 10 Ω·m，分辨率评价按 $\lambda/4$ 波长定义。

目前，地震勘探的分辨率通常为 20～30 m，波长为 80～120 m。可见要达到与地震勘探一样的分辨率，其接收的电磁波频率至少要在 10 kHz 以上。显然，岩性探测仪研制者说他们的仪器能在数千米深度上分辨几米的砂岩是不可信的。

（二）高频电磁波的穿透深度很小

由于地层对电磁波的吸收很强，高频电磁波在地层中很快就被吸收掉，这就是所谓的“趋肤效应”。通常穿透深度表示为：

$$Z_{\mathrm{P}}=\frac{\lambda}{2\pi}\approx\frac{1}{2\pi}(10\cdot\rho\cdot T)^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

式中，Z_{P} 的单位为 km。[1] 由式(4)可见，电磁波每走 $1/2\pi$ 个波长，电磁波就衰减 1/e，即 0.368 倍。若电磁波频率为 10 kHz，那么电磁波的穿透深度只能达到 16 m(参看表 2)。于是从 1000 m 深度上，即使是单程反辐射上来，回到地面的相对强度将为：

$$E_{\mathrm{r}}=\left(\frac{1}{\mathrm{e}}\right)^{62.5}=7.18\times10^{-28} \tag{5}$$

由式(5)可以看出，相对强度如此微弱的信号是很难用仪器观测到的。由此可见，目前传闻的岩性探测技术精度可达到±1.5 m 以内的说法是令人难以置信的。

为了进一步说明问题，我计算了不同频率的电磁波从 1000 m 及 3000 m 深度上返回的相对强度以及其延迟时间，如表 2 所列。

表 2 电磁波的吸收及延迟时间

频率/Hz	穿透深度/km	单程深度 1000 m		双程深度 3000 m		
		返回强度	延迟时间/s	返回强度	延迟时间/s	迟到周期数
0.0001	160	99.4%	10	96.3%	60	0.006 个周期
0.01	16	93.9%	1	71.4%	6	0.06 个周期
1	1.6	53.5%	0.1	2.3%	0.6	0.6 个周期
100	0.16	1.93×10^{-3}	0.01	5.18×10^{-17}	0.06	6 个周期
10000	0.016	7.18×10^{-28}	0.001	微小之极	0.006	60 个周期

注：在计算中，假设 $\rho=10\ \Omega\cdot m$。

由表 2 可见，3000 m 深度的反辐射信号，即使频率为 100 Hz，也已经衰减到 5.18×10^{-17}，不能被接收到。因此要探测 3 km 以下的信号，必须使用 10 Hz 以下的低频电磁波，而如此的低频波恰恰是用耳朵听不见的。在表 2 计算中还假设电磁波反辐射的反射系数为 1，否则回来的波还要更弱些。表 2 还说明，低频信号的返回时间很长，可达 60 s。我们也不知道该仪器研制者如何区分开哪个波是从地面下去的波，哪个是经地下延迟 6～60 s 返回的波？

此外，从表 1 中还可以看到，不同频率的电磁波在地层中传播的速度是极不同的，其大小相差可达 10000倍。高频走得快、低频走得慢，这就会造成极严重的“色散现象”。地下返回的电磁波的波形也将十分复杂，从而使电磁波波场的反演问题变得十分困难。

（三）勘探深度的标定没有这样简单

电磁波在地层中的吸收作用对于相近的频率而言，其吸收是渐变的。此外，频率与深度之间并不存在线性或简单的函数关系。因此，地下传来的反射信号不可能通过简单的改变频率而划分出不同深度上来的信号。换一句话说，岩性探测仪器的旋钮读数不可能简单的代表某一特定的深度。

（四）时间域电磁波的特点很复杂

大地电磁波信号在时间域中是一些不规则的、不稳定的脉动交变场。图 1～图 3 是石油物探局在内蒙古 D_7 测点上的大地电磁野外实测记录。一般测量时分高低 3～5 个频档接收。此例中采用高、中、低 3 个频档：高频段为 0.1～250 Hz，中频段为 0.01～10 Hz、低频段为 0.002～1.25 Hz。每张记录得 E_x、E_y、H_x、H_y 及 H_z 五条曲线。前两条为水平电场分量，后三条为磁场分量。图中 R 为记录段编号，每次一段记录有 4096 个采样值。高频采样率为 30 ms，中频为 0.5 s，低频为 10 s。从图中可以看出，时间域接收的波形是极不规则的脉动交变场，它包含着各种频率成分。这就是 MT 方法的原始记录，也就是大地电磁场的本来面目。

图 4～图 6 是图 1～图 3 观测后第二天白天在同一个点上的重复观测结果。白天大地电磁的变化较强（个别道上存在很强的电道的及磁道的干扰脉冲，这是不合格的记录）。对比前后 6 张图说明，即使在同一测点上的相同频档上，曲线形态（读数）也是随时间而任意变化的。

从这里就完全能解释清楚为什么 GI 公司的 PS 仪器和陈维权的 CYT 仪器所测定的数据永远没有“重复性”的道理。因为大地电磁场在同一频率档上是随时间而随机涨落的，没有一定的规律性。

那么 MT 方法为什么可以探测地下的地电剖面呢？差别就在于 MT 方法是利用傅氏变换在频域作分析，并作了大量的统计平均，以及采用一整套数据处理方法，才能计算出频率域各分量的功率谱，从而推算出测点的地电剖面中的“张量阻抗”，包括视电阻率 ρ_{xy}、ρ_{yx} 两条曲线，以及相应的相位曲线。这和 PS 仪器及 CYT 仪器直接利用不规则的接收脉冲是有着本质区别的。通过 MT 测量所计算的 ρ_{xy} 及 ρ_{yx} 曲线在同一个点上是具有重复性的。图 7 是石油物探局在西藏用同一仪器、在同一个点上两次测量的结果，有着极好的重复性。图 8 是 4 台不同仪器（2 台为加拿大制造，2 台为美国制造）在河北省固城同一点上、不同时间的测量结果，它们也都具有极好的一致性。

目前正规的MT方法，即使采用了现代的各种科学处理手段，它的分辨率也还是很差的。在地下1～10 km范围中，最多也只能划分出少数几个层来，分辨率约为500～100 m。显然，MT方法的分辨能力较地震方法差一个数量级左右。

尽管MT方法目前还有很多缺陷，精度尚不高，但它是科学的(它的缺陷是使用了天然场，近年来采用了增加“远参考道”技术后，采集精度有所提高)。而PS仪器及CYT仪器是属于不科学的。因此，不可能想象Petro-Sonde的分辨率会超过MT方法的能力。

(五)“截频滤波器”是不可能实现的

岩性探测技术研究者的另一个理论是：“从地下界面上反辐射上来的信号是阶跃式分段函数，因此可以通过不断地微分，得到地下不同深度岩性界面和各种矿物成分的有用信息”。并认为通过“截频滤波器”可以分离地下反辐射上来的信号[2]。

实际上，在现代化的地震勘探数据处理技术中，即便使用了大型计算机和穿透能力很强的地震波，通过各种先进技术，做各种反褶积处理及波动方程偏移成像，也还难于获得地下的反射系数序列。因此，人们很难想象在既没有“起始零时”和“终了时间”的脉动信号，也不知道入射波的波形和地下传播机理的情况下，这么小的一个“黑匣子”，能有如此神奇的功效。

当今在地震勘探中广泛采用的反褶积方法的确可以进一步分辨从地下不同深度反射回来的脉冲信号。但它的前提是，“必须是进入地下的激发脉冲只有一个，并且对它的波形有某种先验知识”，否则无法实现反褶积。例如我们对地震爆炸脉冲(子波)的振幅谱是可以大致知道的，并且在假设地震子波是接近最小相位，而地下反射系数序列又接近为白噪等假设条件下，反褶积才取得了成效。而使用可控震源进行地震勘探时，检波器既接收到入射波又接收反射波，就是说可控震源的振动波形是已知的，开始振动的时间也是已知的(即知道零时在哪里)，这种情况下，才能将连续记录的，既有入射波又有反射波的振动波形，通过相关技术把地下来的一个个脉冲检测出来。而大地电磁波不是人所能控制的，入射波场是未知的。入射波场与反射波场一起到达，也不知道起始点在哪里，终了点在哪里。这种情况下任何反褶积或微分、相关技术都将无计可施。更何况人的耳朵及PC-1500计算机里根本就没有反褶积的功能，如何能实现脉冲的分离？而且哪里来的精度达到1.5 m？因此我们说，这种截频滤波器是不可能存在的。

综上所述，岩性探测仪器研制者及其研究者提出的有关理论依据都是令人难以置信的。

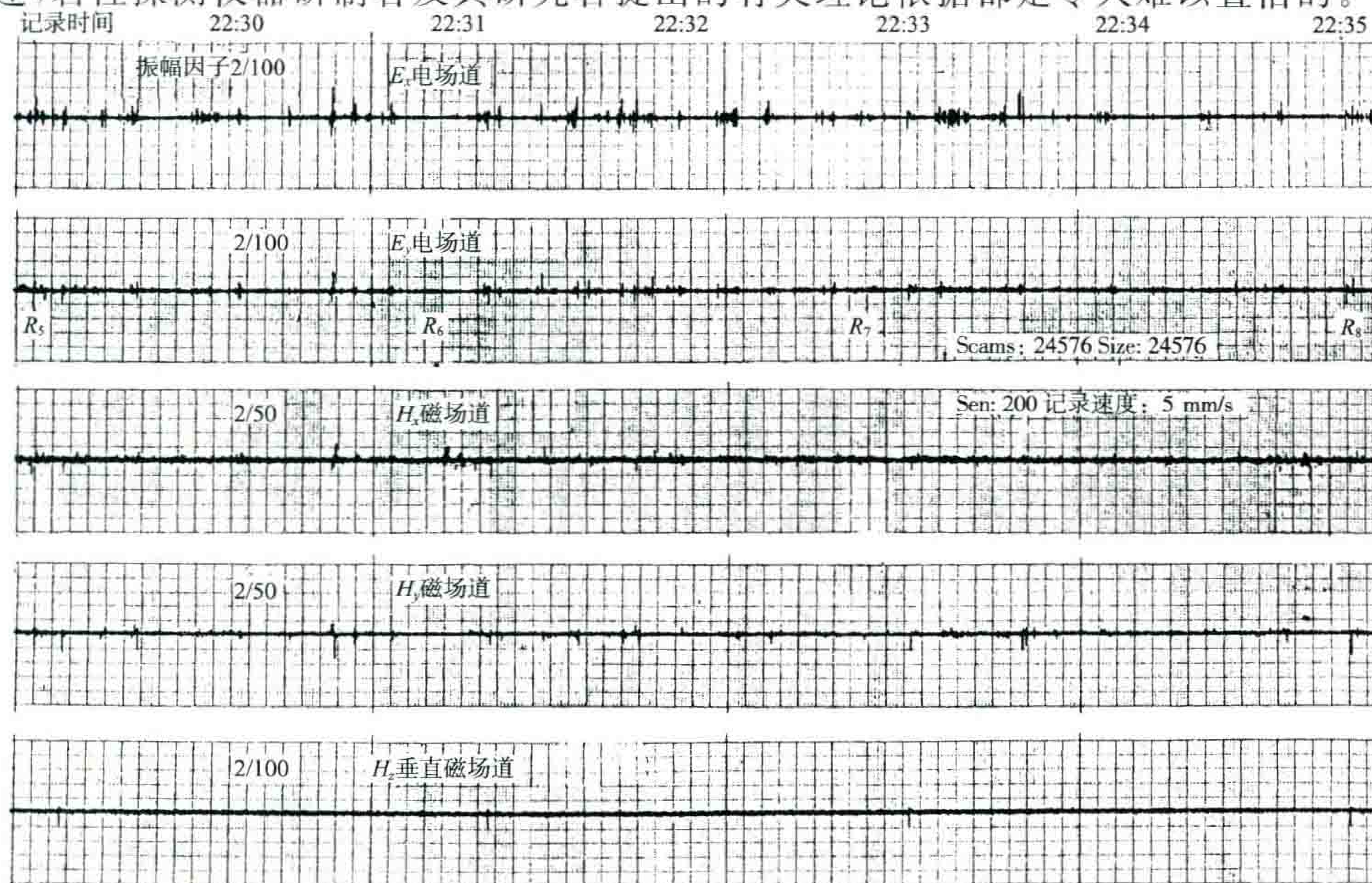


图1　大地电磁MT法野外实测曲线(1989年12月19日：22时29分～22时35分)

(高频接收段0.1～250 Hz)

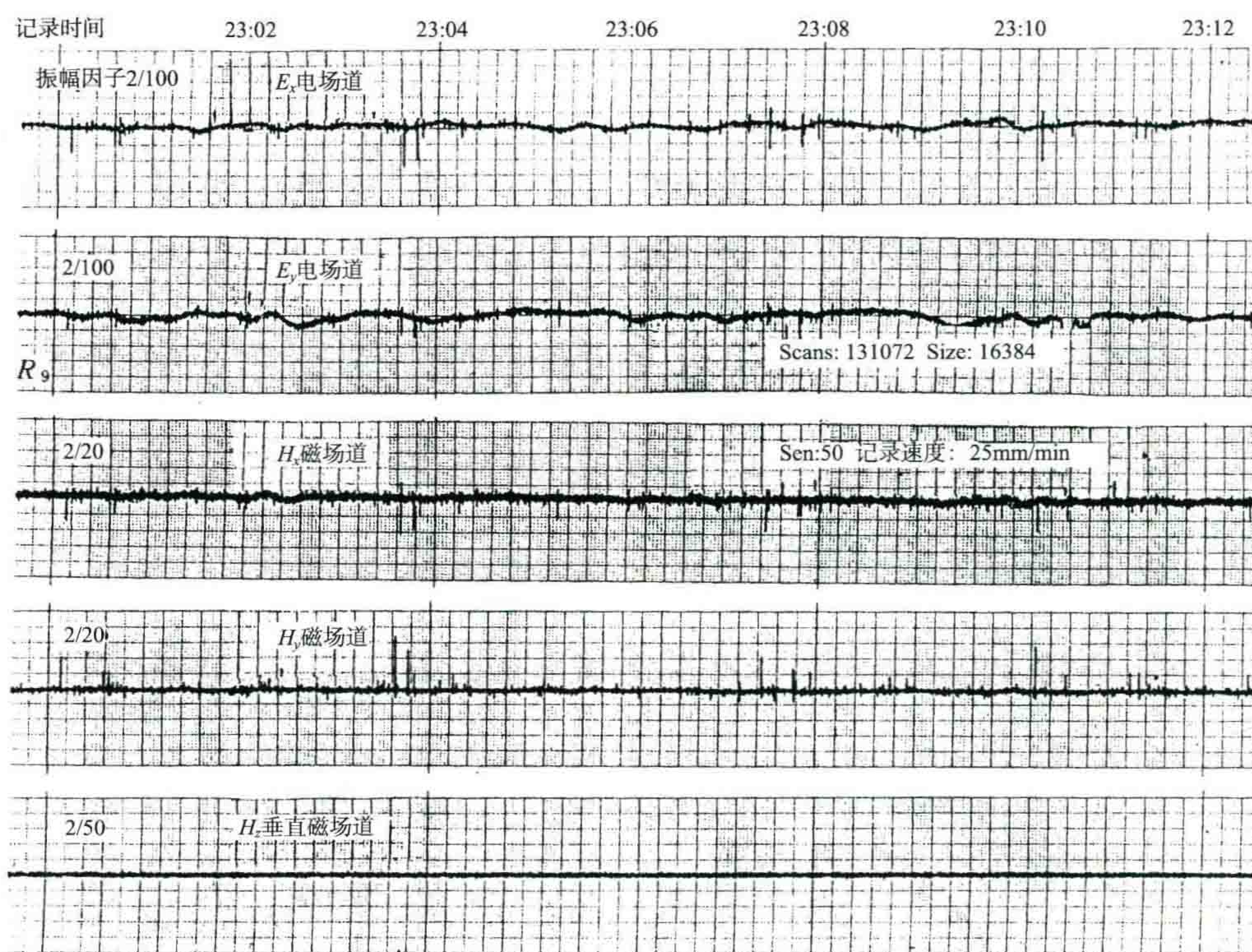


图 2　大地电磁 MT 法野外实测曲线(1989 年 12 月 19 日:23 时 01 分～23 时 12 分)

(中频接收段 0.01～10 Hz)

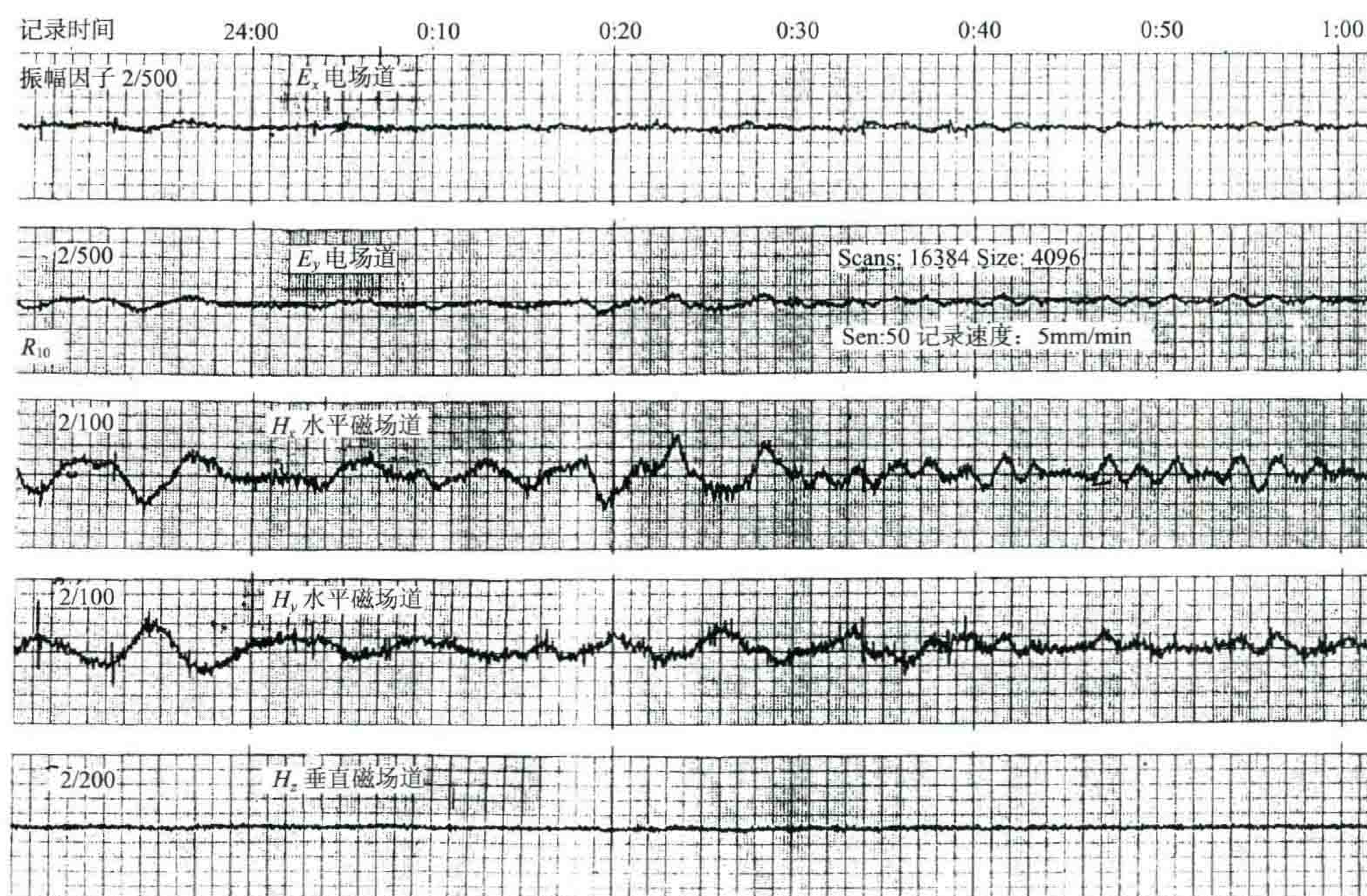


图 3　大地电磁 MT 法野外实测曲线(1989 年 12 月 19 日:23 时 50 分～次日凌晨 1 时)

(低频接收频段 0.02～1.25 Hz)

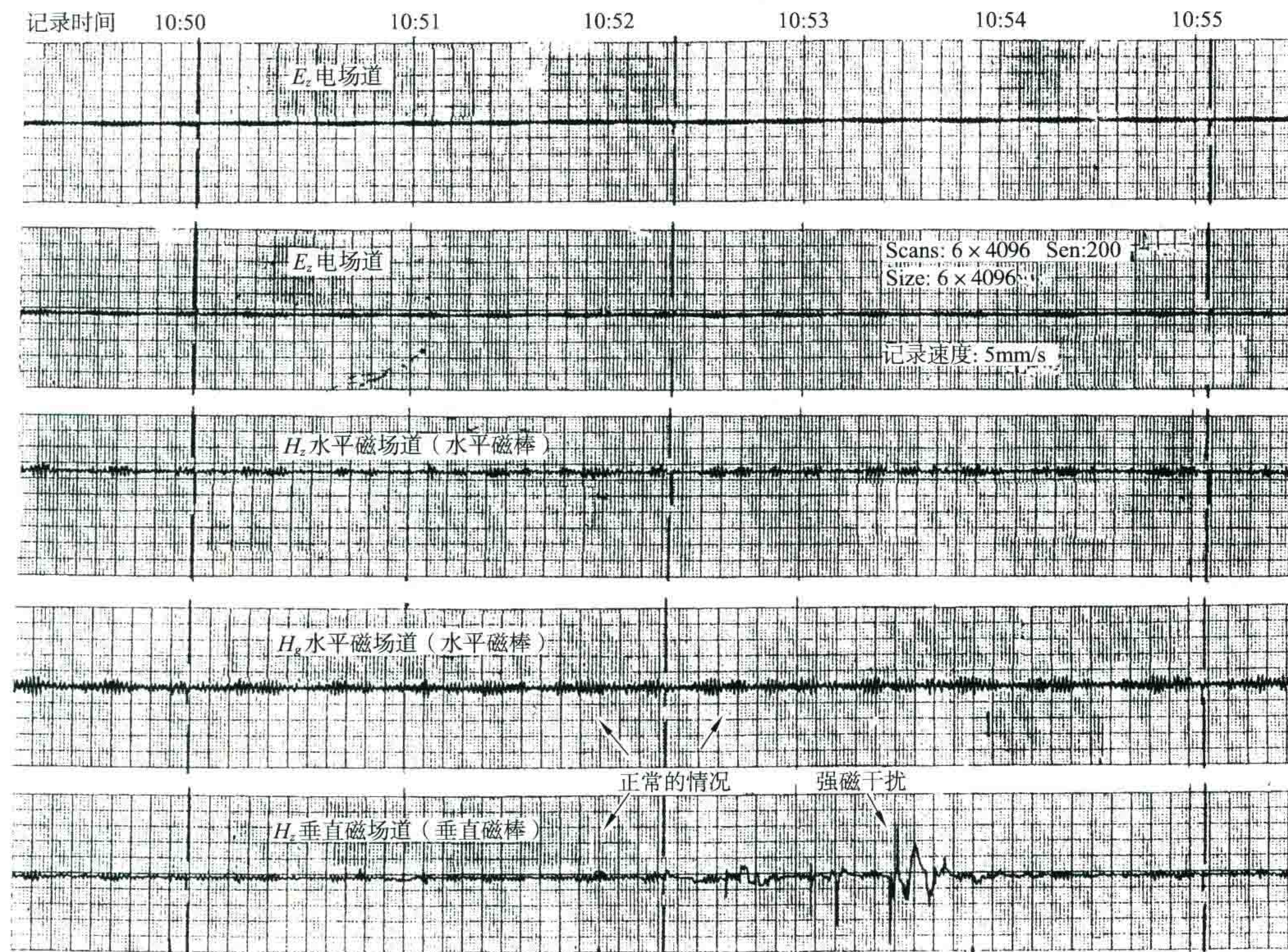


图 4 大地电磁 MT 法野外实测曲线(1989 年 12 月 20 日:10 时 50 分～10 时 55 分)

(高频接收段 0.1～250 Hz)

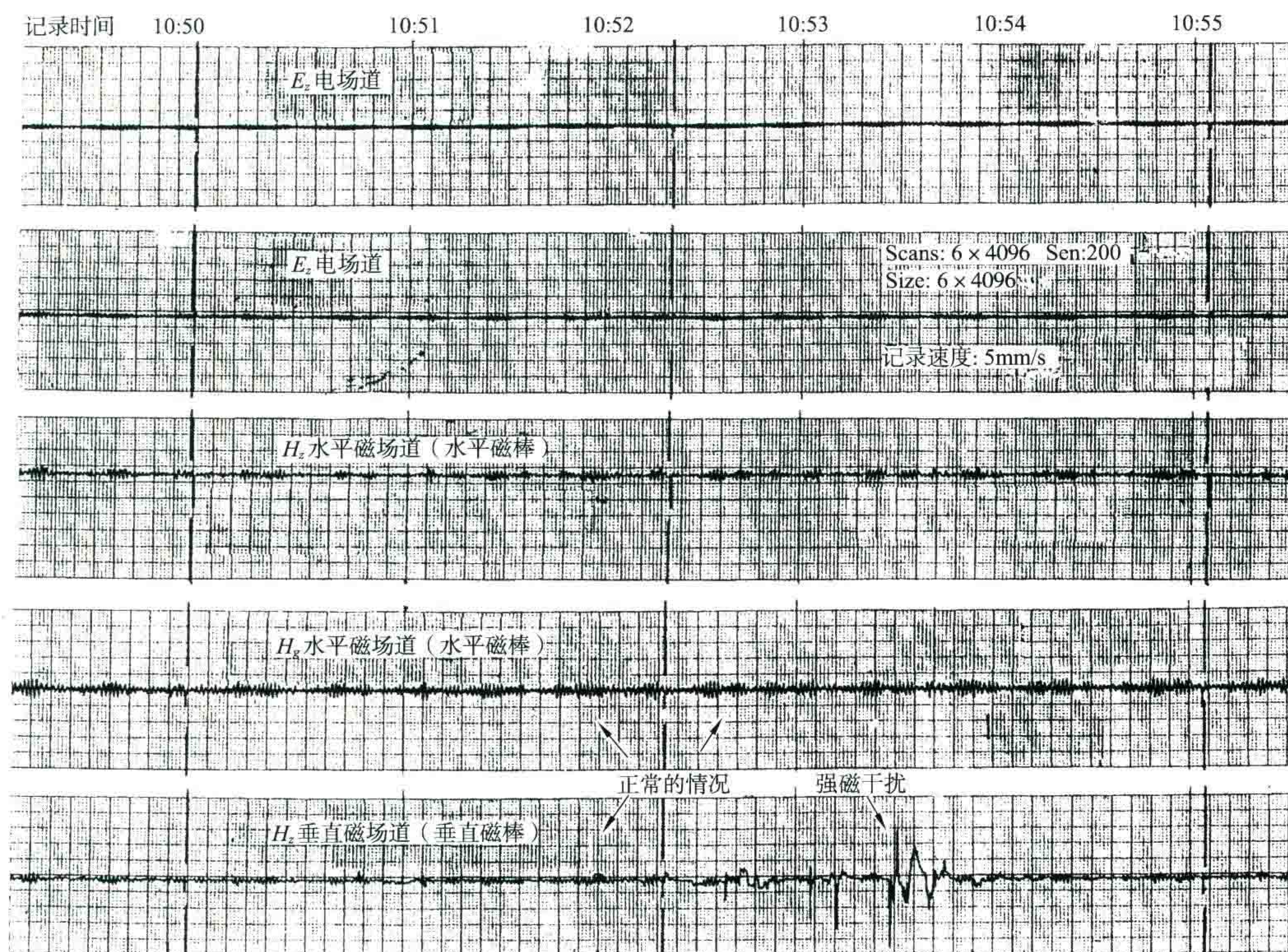


图 5 大地电磁 MT 法野外实测曲线(1989 年 12 月 20 日:12 时 08 分～12 时 22 分)

(中频接收段 0.01～10 Hz)

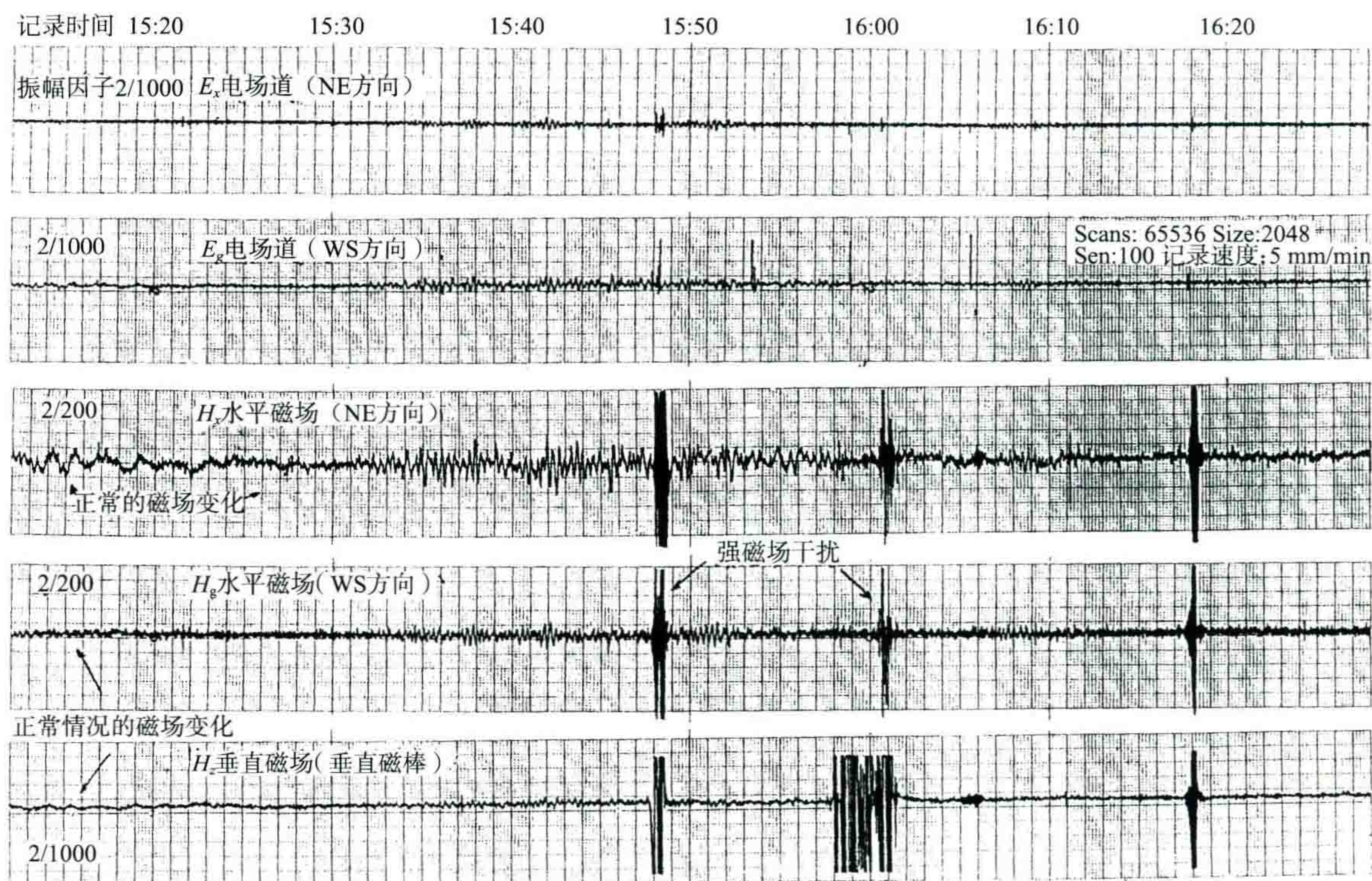


图 6 大地电磁 MT 法野外实测曲线（1989 年 12 月 20 日：15 时 11 分～16 时 30 分）

（低频接收段 0.002～1.25 Hz）

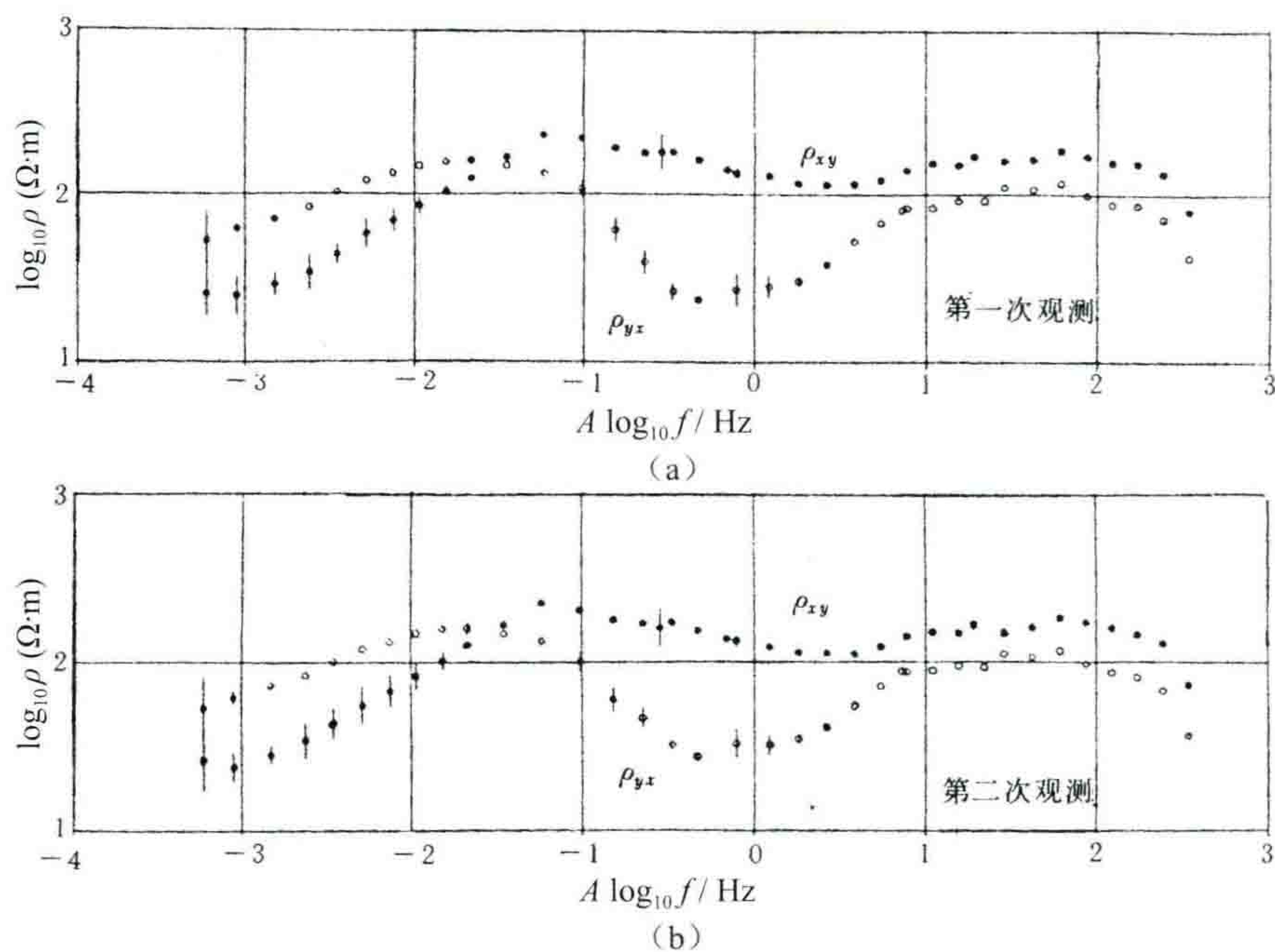


图 7 大地电磁 MT 仪器重复观测结果

（1995 年 6 月在西藏羌塘盆地由石油物探局用美国 MT-1 型仪器在同一点上两次观测的结果）

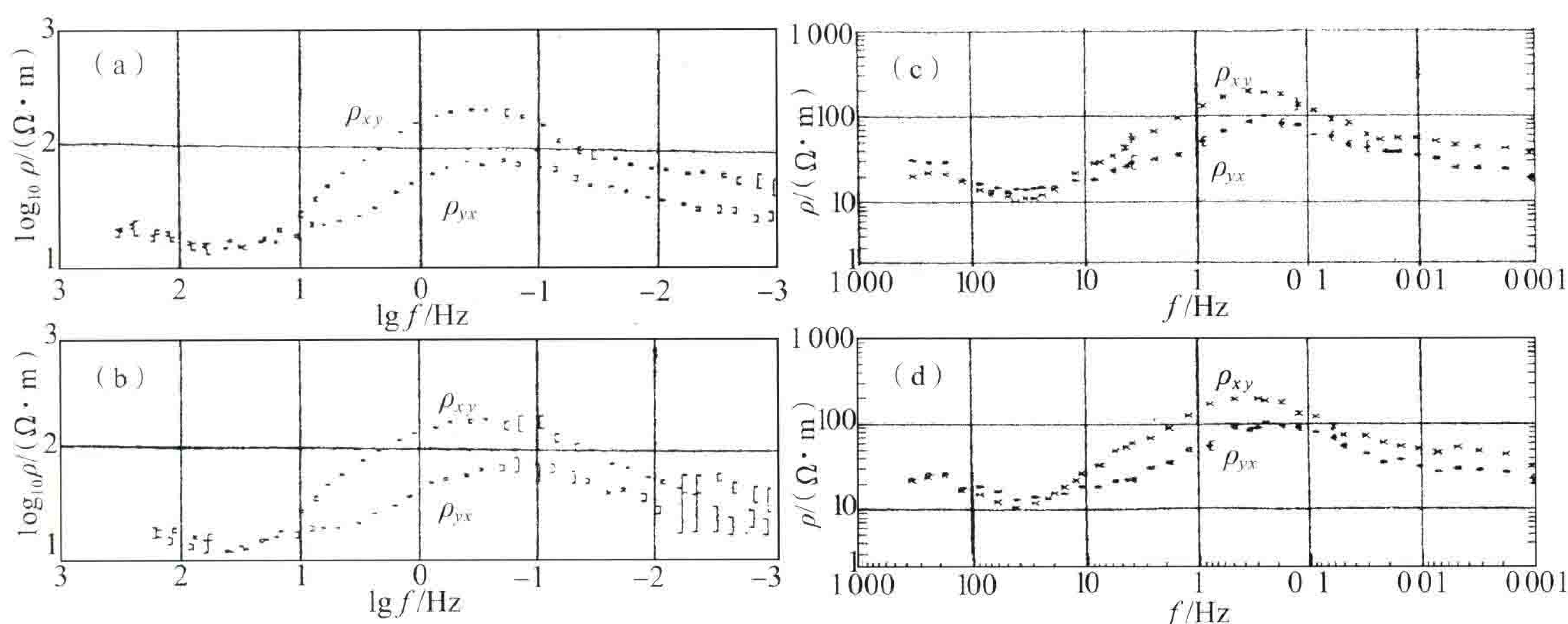


图8　在同一个点上不同仪器的结果对比(河北省固城)

(a) 1995年3月23日由有色金属局用加拿大V5型仪器观测；(b) 1995年3月29日由大庆物探公司用加拿大V5型仪器观测；(c) 1995年3月22日由中南工业大学用美国MT-1仪器观测；(d) 1995年3月23日由核工业部用美国MT-1仪器观测

三、大地电磁场的脉动变化规律

图9是法国ELF公司对大地电磁场统计分析其强度分布的一个说明例子。图中采用双对数坐标系，横坐标是频率或周期，纵坐标是磁场强度及电场强度。由图可见，实线 H 为磁场的变化，在1 Hz以上(向右)其强度低到 10^{-2}nT，所以MT仪器需要装备灵敏度极高的1.8 m长的磁感应接收器，这一点恐怕PS仪器及CYT仪器是做不到的。电场强度在1 Hz附近最低为0.1 V/m。如果在射频端，普通收音机的灵敏度就可以接收5 mV/m的信号。从此图可见到，大地电磁场在不同的频率上是有强有弱的，图中每一个小起伏的强度相差约3～8倍，即随频段的变化，信号强弱变化非常明显。据研究，它是由高空电离层在当地、当时结构起的选频效应所决定的。

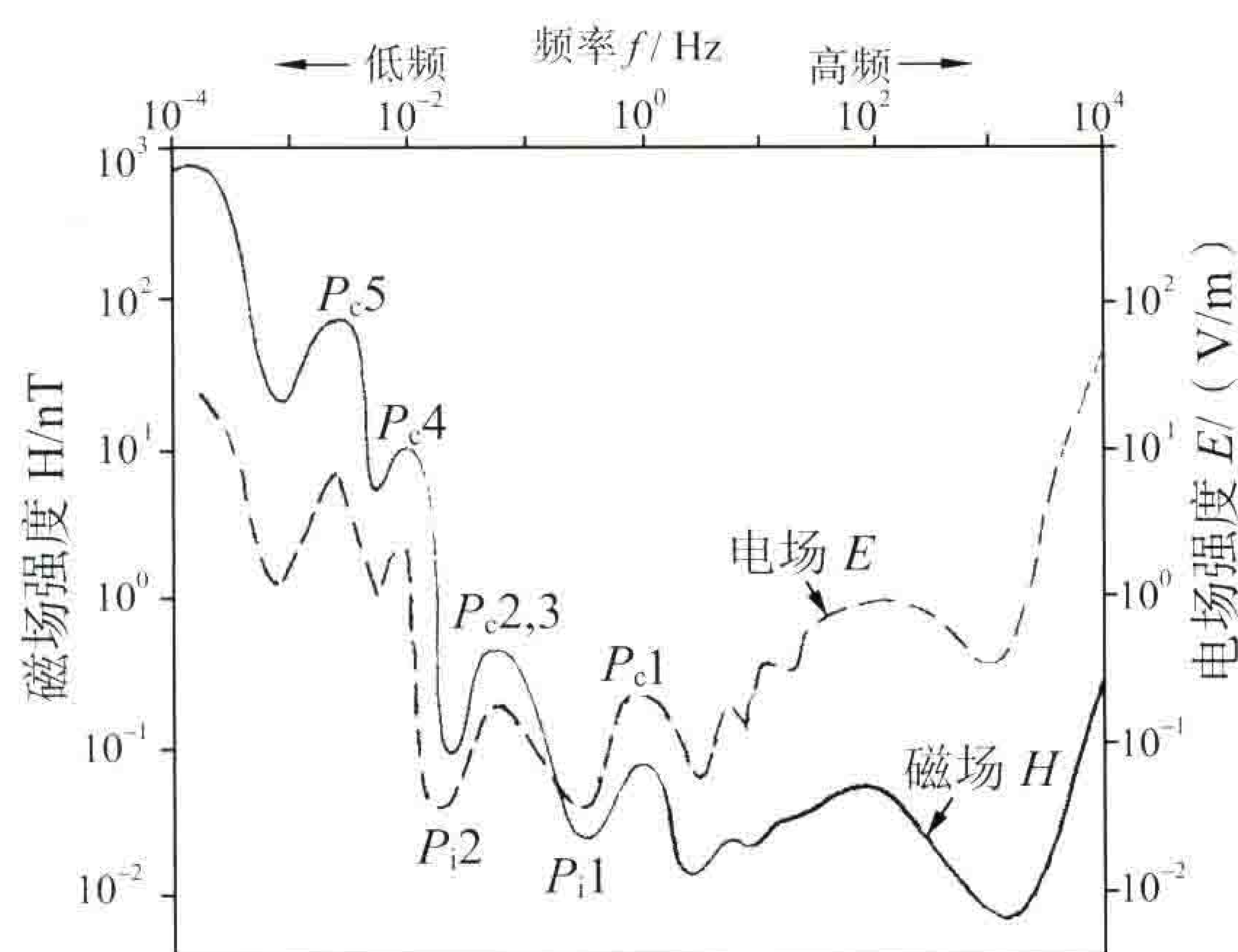


图9　大地电磁场频谱分析图(统计性示意图)

(据ELF公司资料)

岩性探测研制者所说的曲线有某种“重复性”，其实也正是反映了某个地区的大地电磁场在某几个频带上的“强弱差异”的统计规律。但这种统计规律是很难维持长久的。过几个月，这些脉动强振幅(或弱振幅)的频率位置是会转移的。至于这种曲线“具有地层划分意义”的说法也是对这种不同频段“强弱差异”现象的一种误解。由于每台CYT仪器的频段调整不一致，就会产生不同的仪器在同一个点上得不到相同的“强弱差异”规律。

四、岩性探测仪到底测的是什么物理场

岩性探测仪到底测的是磁场还是电场？它测量的频段是什么范围？它用的是什么探头？它用什么办法标定其深度？这些都是岩性探测研制者所回避的问题。这也是几年以来一直妨碍人们对该技术进行鉴定的根本原因。不过在我观看了CYT-Ⅲ仪器的实地操作过程之后，我判断它是一台类似收音机的装置。它接收的大概是射频信号，频段调整在非广播的低频段(当然，也可能它用的是大地电磁的低频频段，不过如果是低频频段的话，那么它的天线灵敏度是远远不够的，只能接收噪声)。它的所谓深度旋钮大概就是收音机用于调谐的可变电容器。读数方法是将放大后的交流“信号”通过一个整流电路，对电容充电，再将电容上的电压值作为其读数值。该仪器的探头大概就相当于普通收音机的一根磁棒天线。不过即使我猜得不准确，但我有充分依据说明CYT仪器无法测量地下来的信息，它测量的只是一种电磁场的不规则变

化噪声。

（一）同一个测点上的试验

1993年，我有幸学习了一次CYT-Ⅲ型仪器的实际操作。我在同一个点上，相隔一小时多，重复了两次测量。两次测量的曲线如图10所示。此图浅层曲线锯齿形的齿距大，深层锯齿密，这并不表示地层的差别，而是CYT-Ⅲ仪器规定的：浅层10 m读一个数，中层5 m读一个数，深层（1200 m）以下2 m读一个数，所以下面锯齿密。对比这两次重复测量的曲线，可以发现它们毫无共同之处，哪里谈得上用它来对比地层，更谈不上用来找油、找水、找煤。

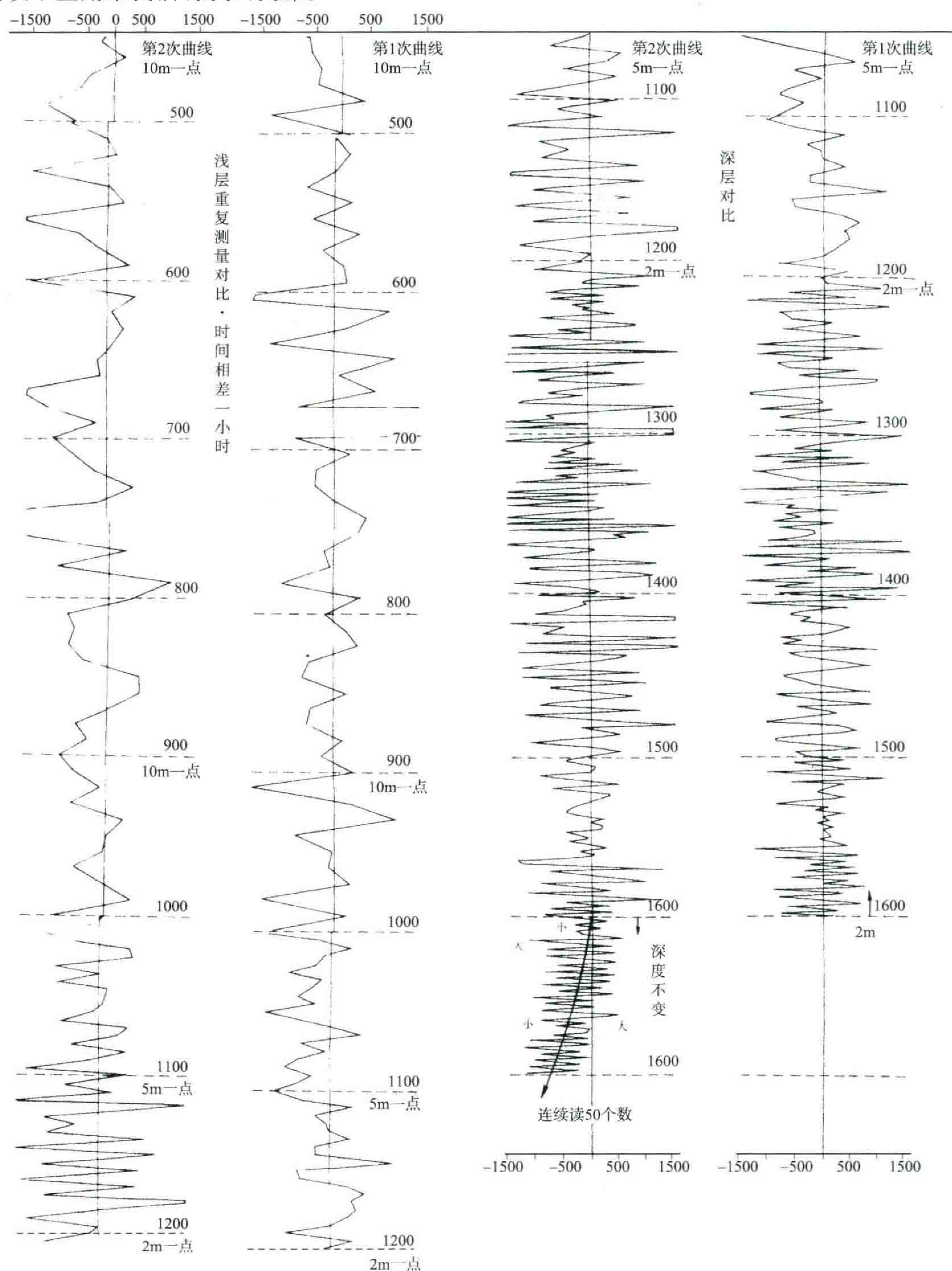


图10 CYT-Ⅲ型仪器的重复性很差，同一深度上的50个读数也各不相同
（1993年9月14日在任丘的试验曲线）

（二）同一个深度上的连续读数

该仪器的研制者还规定：在每一个读数过程中，旋钮转到一个新的位置后，不能马上读数，必须等一个红灯亮了以后，才能记下此数。深度愈大时，红灯亮得愈慢。这是因为对电容充电须要一定的时间。估计由于使用了整流后向电容充电的方式，所以当频率逐渐变低（所谓深度逐渐增加）时，电容的交流阻抗变高，输出的电压就愈来愈大，曲线就会愈来愈往右偏，使得 PC-1500 机打印曲线出格。为此，该研制者设计了一种读数纠正方法。我猜他是每读一个数，在程序中减去一个常数，使得曲线向左回到正常位置来。也因为这个原因，他规定读数时，“深度”必须一个一个从浅到深依次来读，而且在每个“深度档”上都必须从头上读起。这是他为了保持曲线能够经常保持在正常位置的措施。

我有意作了如下的试验：在测量过程中，我让“深度”不改变，连续在同一个深度（1600 m）上连续读 50 个数，结果这 50 个数有的大，有的小，也是来回摆动个不停。只是曲线向左有了漂移。漂移的原因大概是每读一个数，程序自动减一个常量所造成。再看这 50 个数中有正有负。正、负值距离漂移中线的振幅也可以达到 1 cm 以上。这种情况进一步证明了 CYT 仪器读数的不科学性，即在同一深度上的连续读数值实际上是一个任意值。

该读数不固定的原因很简单，请看大地电磁本身的变化曲线（图 1～图 6）。例如图 1 中最上面一条曲线，电场的变化是极不稳定的，你在 22 时 31 分读数时，数据很小，但时隔数秒钟以后再读数，它就能差许多倍。

五、在五个油田进行试验的情况

（一）所有岩性探测仪器的读数完全没有重复性

1991 年陈维权制造 5 台 CYT-Ⅲ型仪器，分别到 5 个油田进行了初步试验。这 5 台仪器测试结果有一个共同的特点，即均无重复性。

现以大港油田的试验结果为例。图 11 是大港油田利用 10 号仪器在两天之内于 F16 井同一个点上测得的 6 条曲线。明白人一看就知道，这是不科学的数据采集。只有 1000～1700 m 一段有梳状高锯齿的特点，但第 3 次及第 6 次，尤其第 5 次却没有这种特点。上下似乎有些分层的特点。但我在前面说过，这是由于电磁场在不同频段上具有“强度差异变化”所造成，并不是由地下因素引起的。

在大庆、华北、中原等油田测试结果也大体上是这种情况，即不同的仪器在同一个点观测结果无共同之处，同一仪器在同一点上重复观测结果也无重复性。

图 12 是在河南油田利用 8 号仪器与 5 号仪器在 N33 井同一个点上所测的曲线对比，也可以看出，这两台仪器所测的结果是完全不同的。

华北油田报告中未提起重复观测的情况。

图 13 是大港油田在板深 51 井同一点上，采用三台岩性探测仪同时测量的结果（19 号、18 号及 14 号），结果是三台仪器的曲线三个样子。在 3700～3770 m 的油层部位也没有见到曲线有相似的反映。

以上列举的事实已经足够说明岩性探测仪的测量结果既无“重复性”，也无“一致性”，当然也无“稳定性”可言。很明显，这种测量结果是极不可信的。

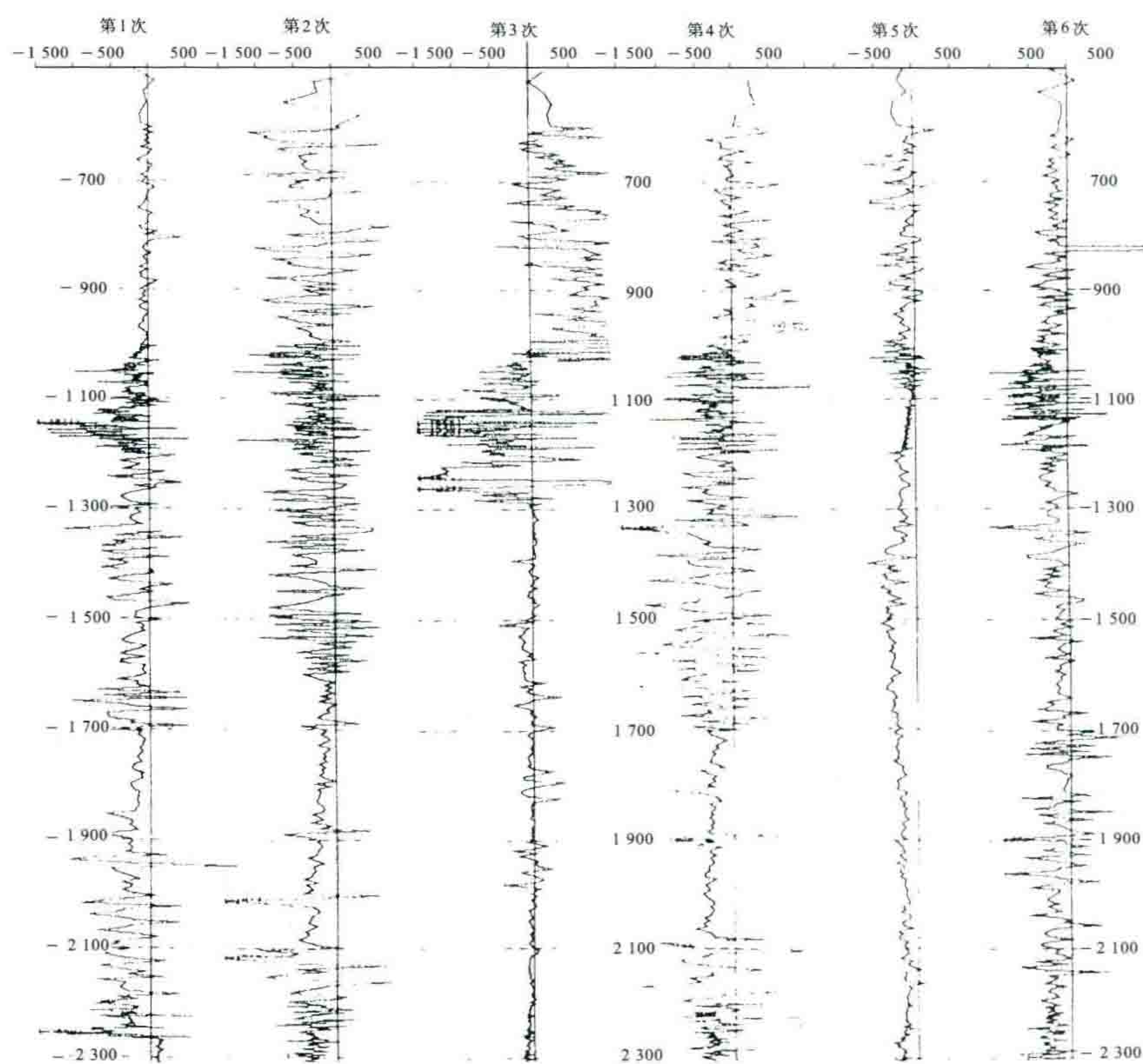


图 11 大港油田利用 10 号仪器在 F16 井同点位、不同时间观测记录对比图

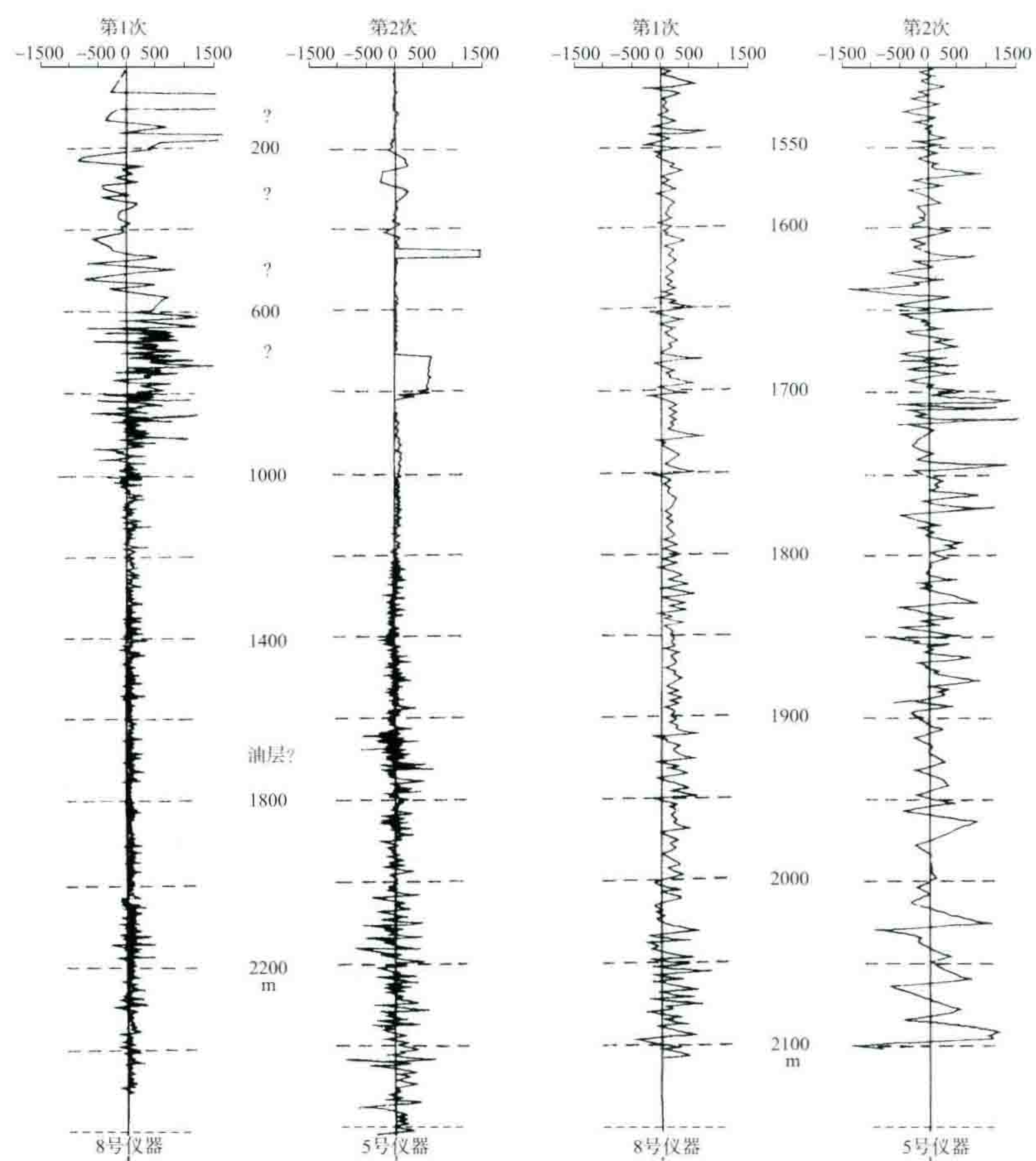


图 12 河南油田利用 8 号仪器与 5 号仪器在 N33 井同一个点上观测的曲线对比

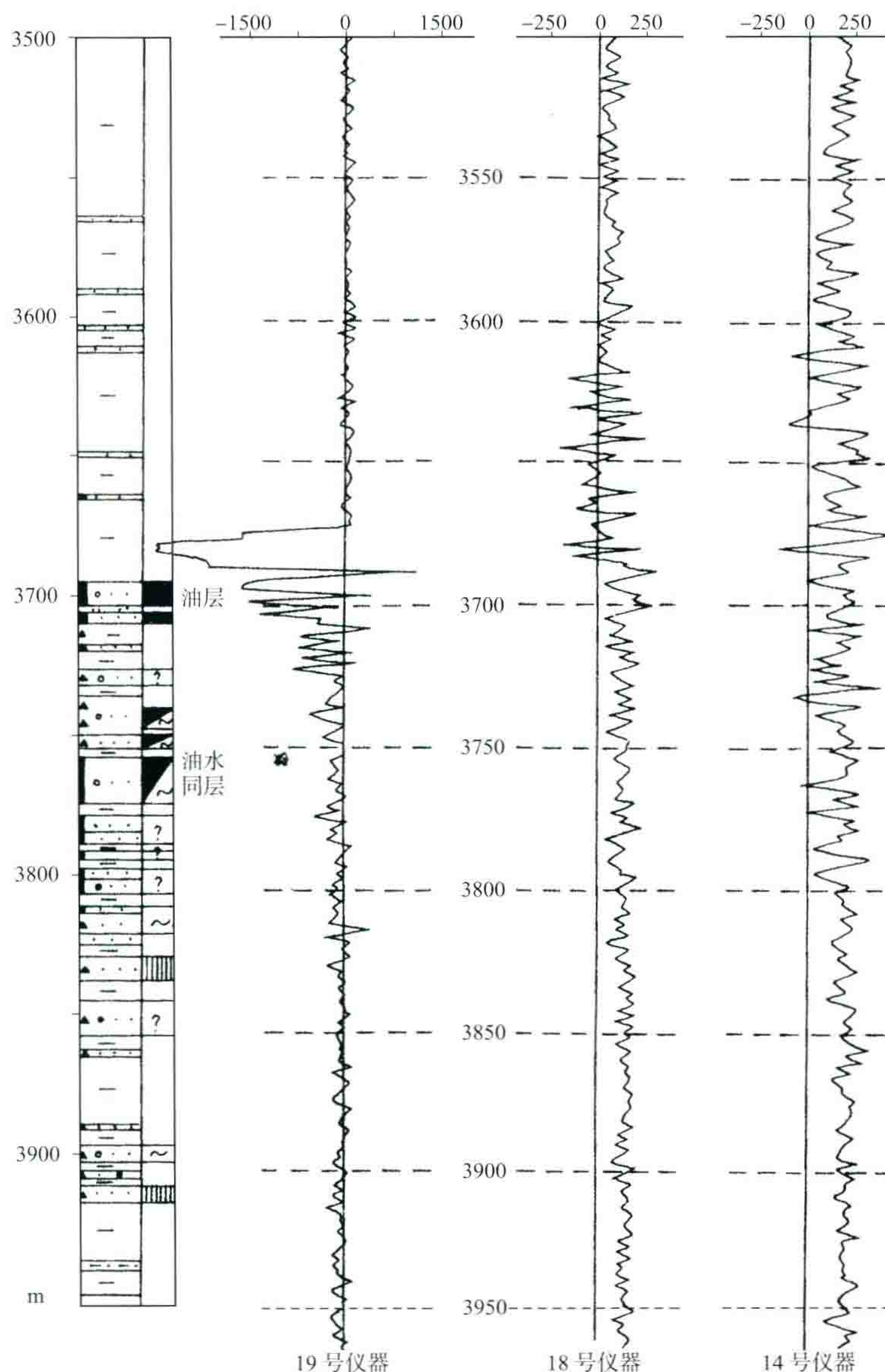


图13　大港油田在板深51井用三台CYT-Ⅲ型仪器在同一点上的观测结果

（二）岩性探测曲线的解释随意性

仅依据这样不可靠的原始资料，有的解释人员居然作出十分惊人的地质成果来。请看有些报告的结论。

华北油田1992年的报告（摘要）中说："应用该技术对G30井的岩性界面及油层预测，经钻探验证，其界面误差小于5%，油层符合率达98%，油层深度误差小于2%。"

河南油田的报告中称："在岩性探测资料的定性解释中，发现探测曲线不仅能反映地下含油气情况，而且能划分岩性段，进行地层追踪对比。分层时，经与钻井对比，深度误差在1%以内。"又说："将岩性探测曲线作'反转'后，与测井的电阻率曲线有一定的相似性。在形态上，它们呈近似反比例关系。"（图14）此图右方虚线为岩性探测曲线，实线为视电阻率曲线，两者似乎也有点像，但这不是普遍规律，而且油层部位并未见岩性探测曲线有什么异常。

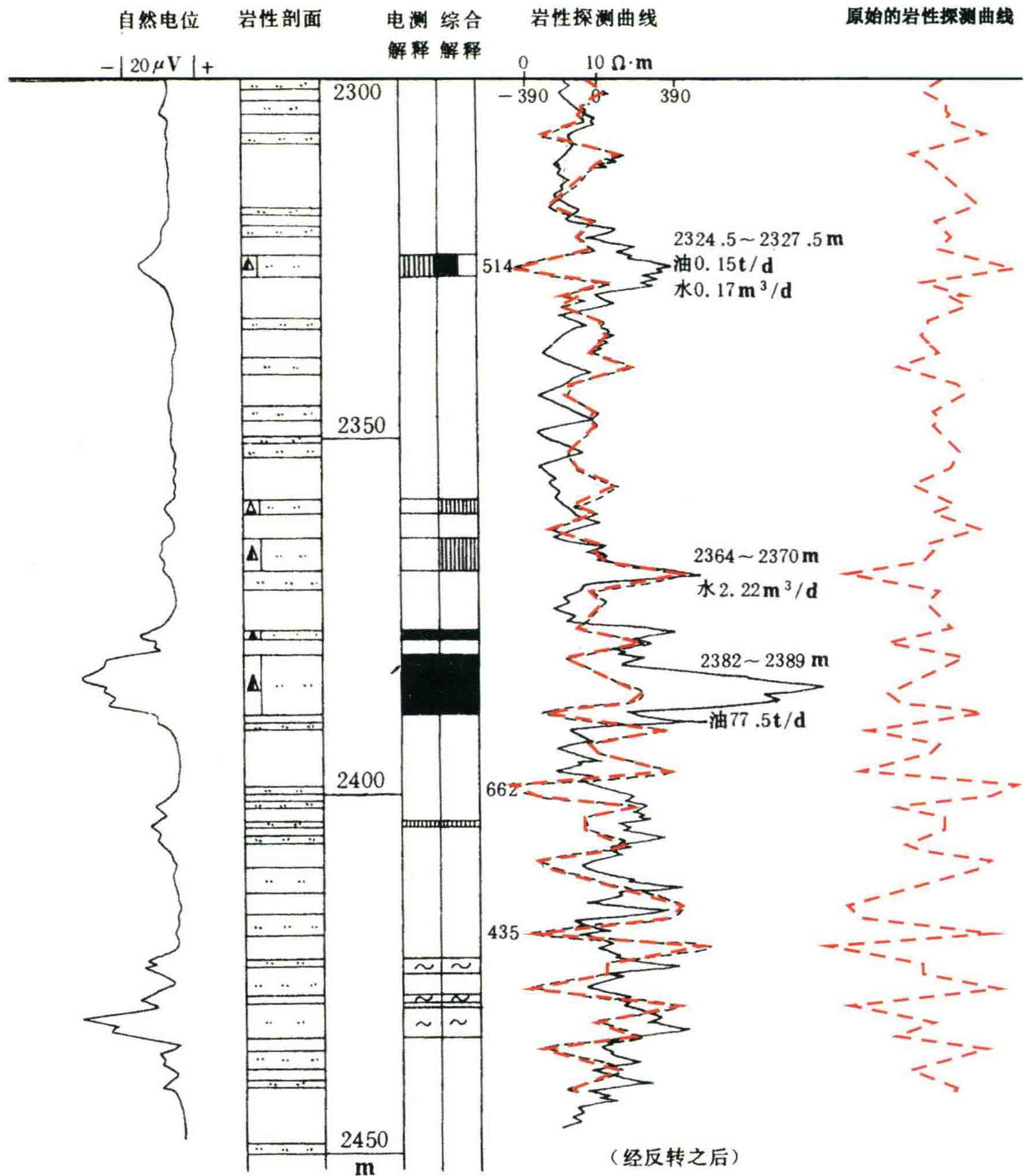


图14 东10井Y-T曲线与测井曲线叠合图

(虚线为岩性探测曲线;实线为视电阻率曲线)

迄今为止,CYT曲线的解释方法是因人而异的。例如对油层的判断方法方面,陈维权给出一种模式,即像图15中曲线a那样,在偏负值的曲线范围中找所谓方形波,指示油层的反映。然而,如现有的岩性探测曲线所示,几乎全井上下到处可见这种波形,岂不是到处有油?

大庆油田有的解释人员又发展成左偏包络的锯齿形曲线反映的是含油气层,如图15中曲线b。而华北高阳地区,有的解释人员又说成右偏波峰,如图15中曲线d。河南油田有的人又说:含油气层是向左偏离的锯齿形强振幅,如图15中曲线e。人们不禁要问,如此各种各样的解释模式不是把所有曲线类型都包括了吗?到底还有什么标准可言呢?

我仔细地阅读了上述五个油田应用CYT-Ⅲ型仪器的报告,发现写报告的人对该技术普遍采取首先肯定它是先进的新技术,然后不管是否资料可信,将它和测井曲线强行对比,并主观地认定它和油层特征相

符合的结论。相比而言，大港油田的试验报告比较实在。有些报告对此技术十分迷信，例如华北油田的试验报告甚至发展了该方法，认为该法可以划分砂泥岩岩性，可以通过对比 CYT 曲线绘出地下的油层横剖面来(图 16)。该图还将断层也对比了出来，我对这些结果感到非常吃惊。

在华北油田的试验报告中还称："在 G30 井经岩性探测预测的 6 套油层，经钻探后证实，这 6 套油层全都存在，油层预测的成功率达 98%，而其深度误差小于 1%，油层厚度相符(表 3)"。

但是，当你仔细审查该仪器观测的原始数据时，发现解释人员的主观随意性极大。我把这 6 套预报的油层深度绘在 CYT 岩性探测曲线旁，如图 17 所示。从该图中根本看不出从事该试验的解释人员所作大胆预报的根据是什么。从实际 CYT 曲线上找不出任何反映油层的特点，有的预报位于正异常处，有的预报在负异常处，哪里来的成功率 98%？

后来，我又发现他们研究的下第三系砂一段下部地层是一套生物灰岩、油页岩与薄层砂泥岩的组合。实际上工区范围内全多含油，构造上是一个缓坡。而岩性探测曲线又是一条不断抖动的曲线(实际上是噪声为主)，到处都有异常，所以到处都能与油层吻合。

我尝试了将 G30 井的 CYT 曲线用"牛头装在马面上"的办法，即硬把它放到 G14 井去，又放到 G101 井去。发现 CYT 曲线都可以与该井油层有一定的吻合性，有的甚至会巧合到比本井还要好。

表 3　G30 井油层解释与钻井揭示油层对比

电场岩性解释(4 月 3 日)			电测解释(5 月 7 日)			深度误差	
显示程度	油气显示深度/m	厚度/m	油层深度/m	厚度/m	显示程度	绝对误差/m	相对误差/%
可疑油层	2460～2465	5	2450～2453 2455～2460	3 5	油水同层 含油水层	5	0.2
可疑油层	2470～2480	8	2463～2466	3	含油水层	14	0.5
油　层	2485～2490	5	2480～2487	7	油水同层	13	0.5
差油层	2515～2520	5	2490～2500	10	含油水层	30	0.7
油　层	2540～2550	8	2523～2526 2532～2545	10	油　层	7	0.1
油　层	2570～2585	10	2551～2555 2556～2562	10	油水同层	33	0.8

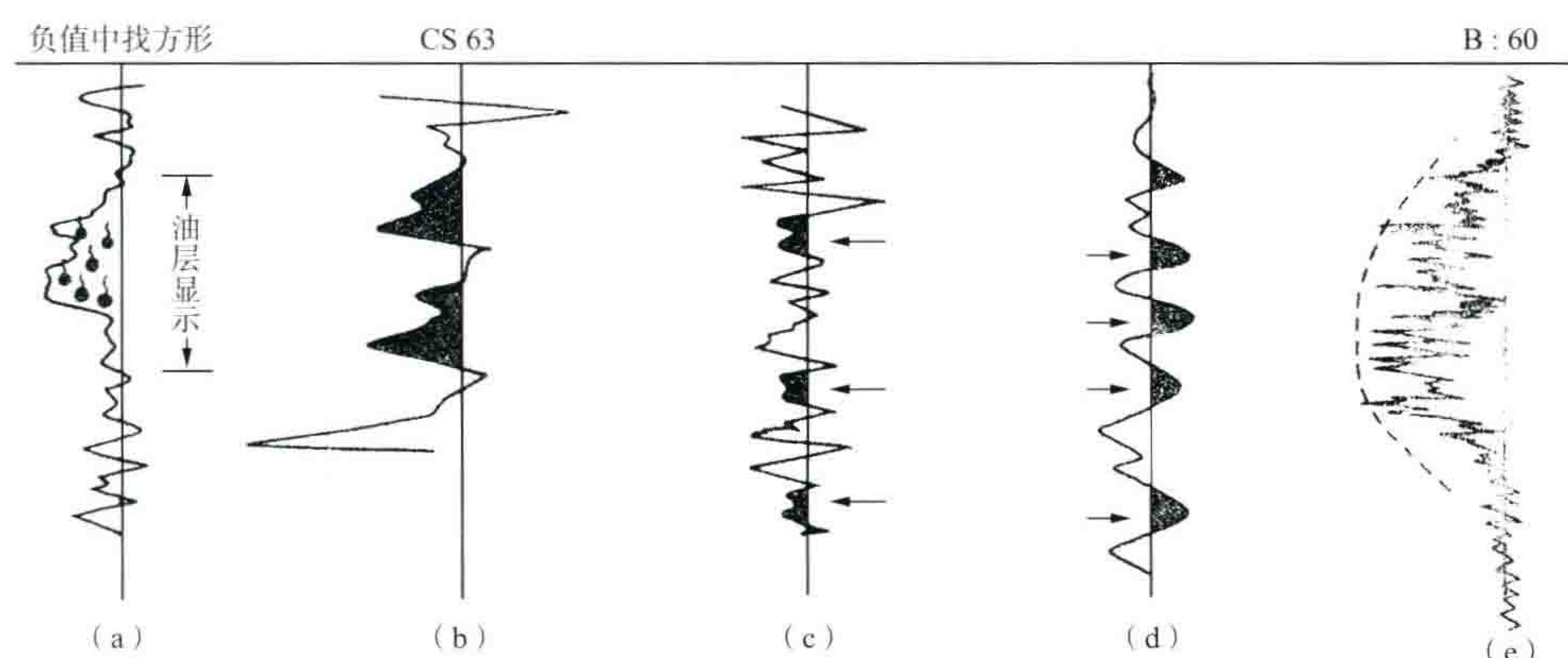


图 15　岩性探测者提供的判断含油气部位的标准

(a) 陈维权，负值中找方形；(b) 大庆油田；(c) 大港油田；(d) 华北油田；(e) 河南油田

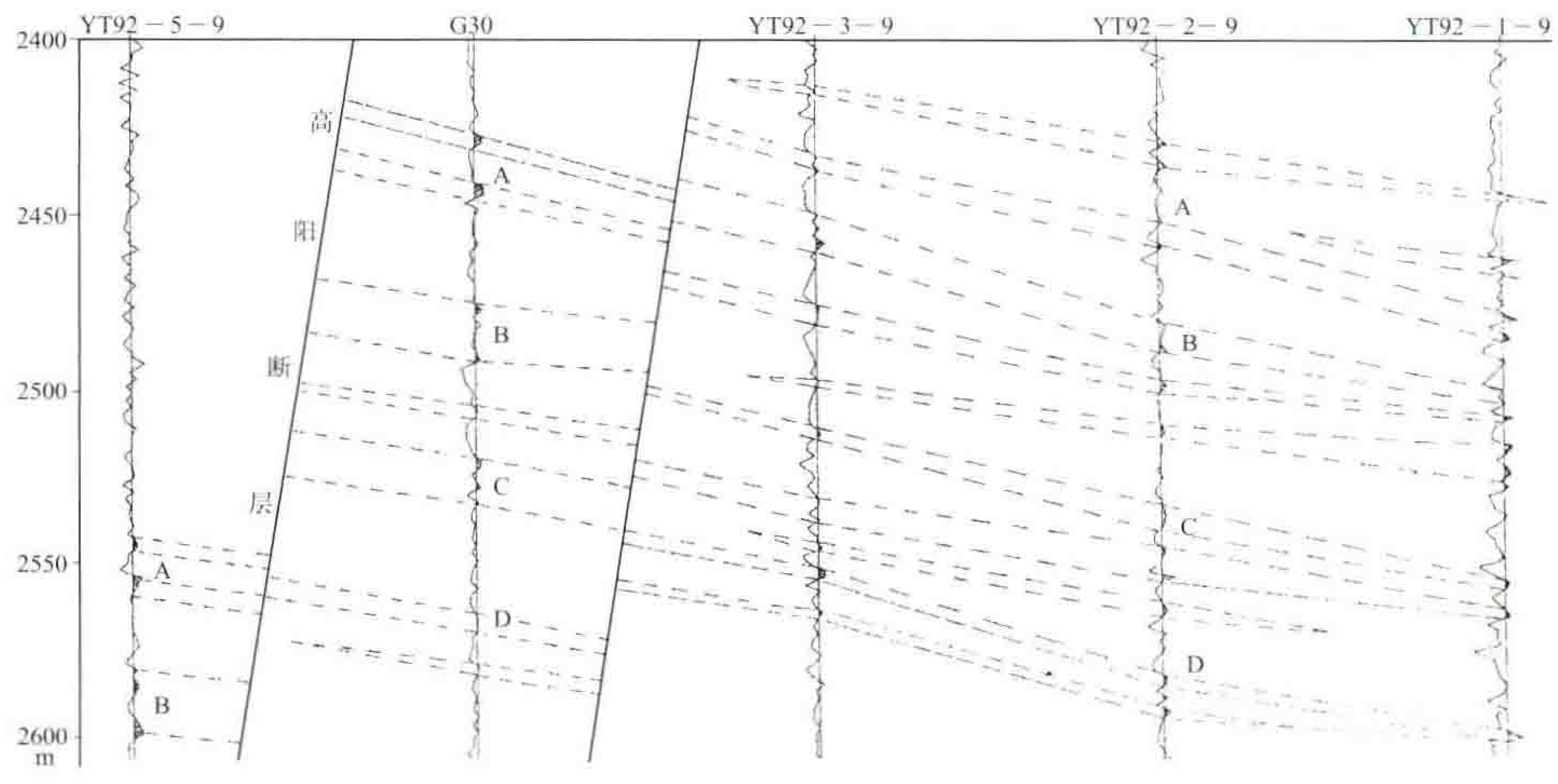


图 16　华北油田岩性探测曲线解释预测油层剖面图

自然电位
颜色
岩性剖面
测井综合解释
岩性探测曲线
-600　0　600
视电阻率曲线
预测六套油层如下
解释为可疑油层
解释为可疑油层
解释为油层
解释为差油层
解释为油层
解释为油层
沙一段底
2440 1 2465
2470 2 2480
2485 3 2490
2515 4 2520
2540 5 2550
2570 6 2585
2450
2475
2500
2525
2550
2575
m

图 17　G30 井岩性探测曲线与综合录井对比图

这些曲线本来就是似是而非的东西。所以，岩性探测技术的解释工作实在令人担心。相信了这种“似是而非”的解释，有时必然导致严重的失败。例如泌阳5口井的预报产油井口口落空。可是有人将这些失败归过于“甲方提供的已知井产量为初产量，过于夸大”[3]。其实，应该说造成失败的根本原因在于，这种岩性探测本来就是不科学的方法。

六、岩性探测技术在形式上的新改进

1992年，黄世矩又改装出新型的岩性探测仪。他采用了更先进的数字记录方式，在延长油矿63井得到几乎和电测曲线完全相似的岩性深度曲线。此外，他除了能绘岩性深度曲线之外，又发展了一种岩性界面曲线，据称“用它划分岩性界面误差不超过两个采样步长”。他还用贝叶斯概率理论为被动式仪器的重复性不好作辩解。[4]但不管你如何辩解，我希望他再到63井上去作10次重复测量，看是否都能得到像他宣传广告中那样好的结果。恐怕马上就露出破绽来，甚至可能会出现完全相反的情况。像河南油田发现的将岩性探测曲线作“反转”后，才能与测井的电阻率曲线有一定的相似性，在理论上是难以说清的。

在清华大学电子工程系一些教师的协助下，陈维权又于1994年推出了CYT-Ⅳ型仪器，声称仪器的重复性可以达到70%。[5]

图18是1994年4月11至12日用CYT-Ⅳ型仪器与过去CYT-Ⅲ型仪器在大港BS51井的对比试验。两种仪器都在同一个点上作了4次重复观测。很明显，过去Ⅲ型仪器的重复性是极端不好的，而Ⅳ型仪器似乎是有所“改善”了，但也绝对看不出有70%重复性。如果计算其相似系数，其相似性也不会超过10%。即使对3700～3800 m之间的两个主要油层的反映，4条曲线表现也各不相同，哪里有什么找油的意义？

文献[5]中所谓的重复性改进主要表现为：1994年4月2日至3日在BS51井所测的资料，经过该文作者用纵向虚线和实线标注之后，似乎有几段弱，有几段强，即所谓“分层能力”（图19）。该文作者可能把这种现象称作“重复性”了。本文前面早就指出过，这种现象仅仅是说明电磁波在某些频段上统计性涨落的“强弱差异”而已，与地下结构无关。而且这种统计涨落是不固定的，几个月以后便不再是这样了，强弱的频段位置也会改变。例如在4月11日的观测记录（图18），就不具备这些特点。

文献[5]还提出划分岩性的模式，即泥岩为主的曲线表现为细小锯齿的变化，砂岩为主的曲线表现为较宽的抖动。人们从这个新仪器观测的曲线上完全看不出这种规律，如图18中3000～3200 m一段井柱子是典型的泥岩段，右边曲线③上也有大跳，3800～3900 m一段井柱子为典型砂岩段，曲线③与④也抖动得和泥岩段并无两样。

文献[5]还在理论上提出一个新观点，即“多次电磁波”概念，认为“低频电磁波在地层中衰减很慢，从而形成该深度与地面间来回反射，形成稳定的谐振”。

首先我怀疑他测的是低频电磁波。从本文前面的论证可以说明，既然第一次来自地下的电磁反射波已经微弱到几乎无法测得，何来的第二次、第三次稳定的振荡？

从CYT-Ⅳ型仪器所测的曲线上看，我推测他使用了去直流漂移的手段。过去CYT-Ⅲ型仪器的基线是不够稳定的，所以引起大庆油田的试验报告中有“包络大幅度向左偏负的是含气标志”的结论。

其次，过去的曲线在不少的点子上往往有曲线出格跳飞的现象，现在Ⅳ型仪器似乎再也不会出格了。据陈维权说他使用了一种“信号整形”手段，不知是如何整的形。

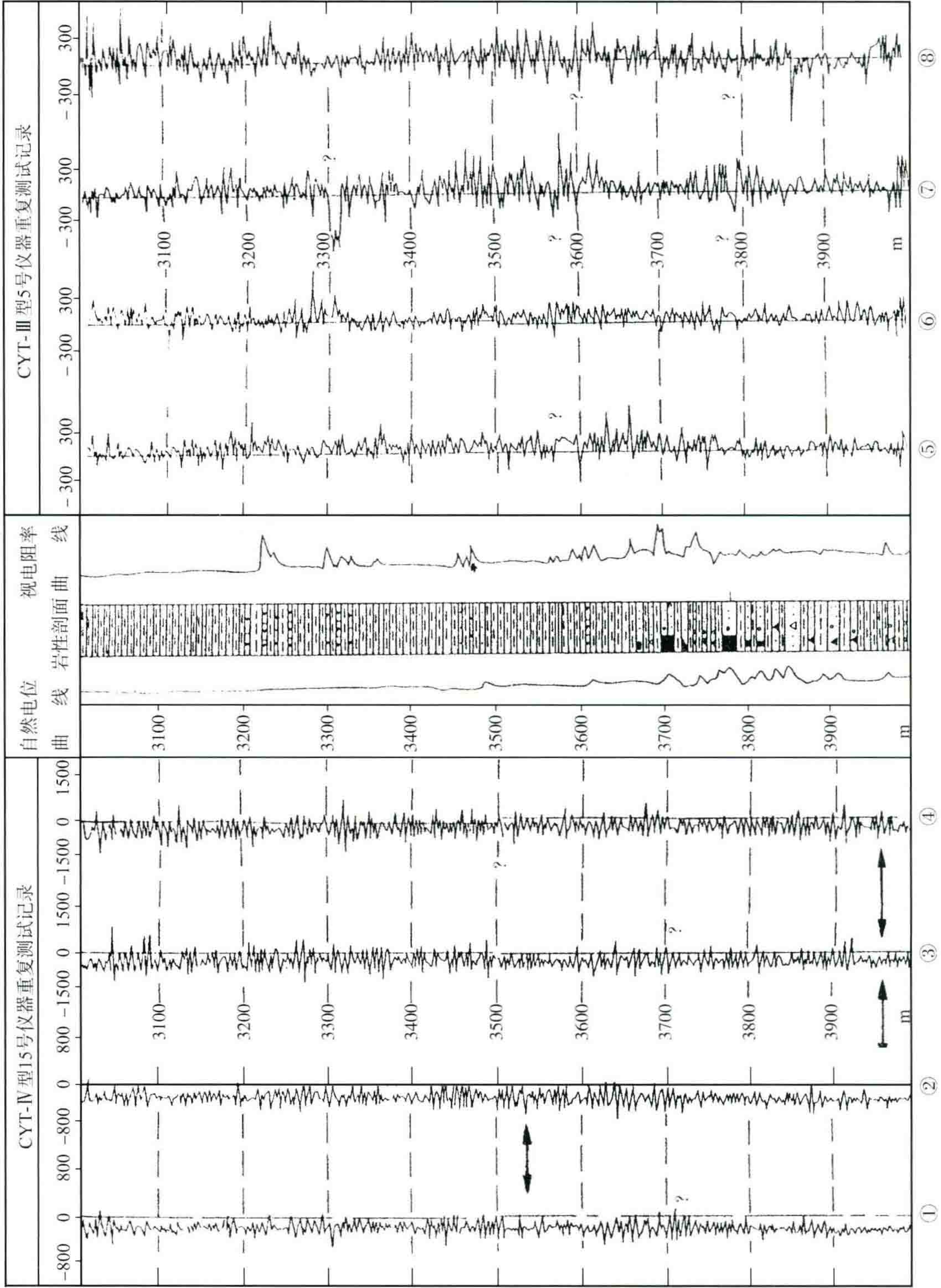


图 18 BS51 井 CYT-Ⅳ型与 CYT-Ⅲ型仪器重复测试对比图

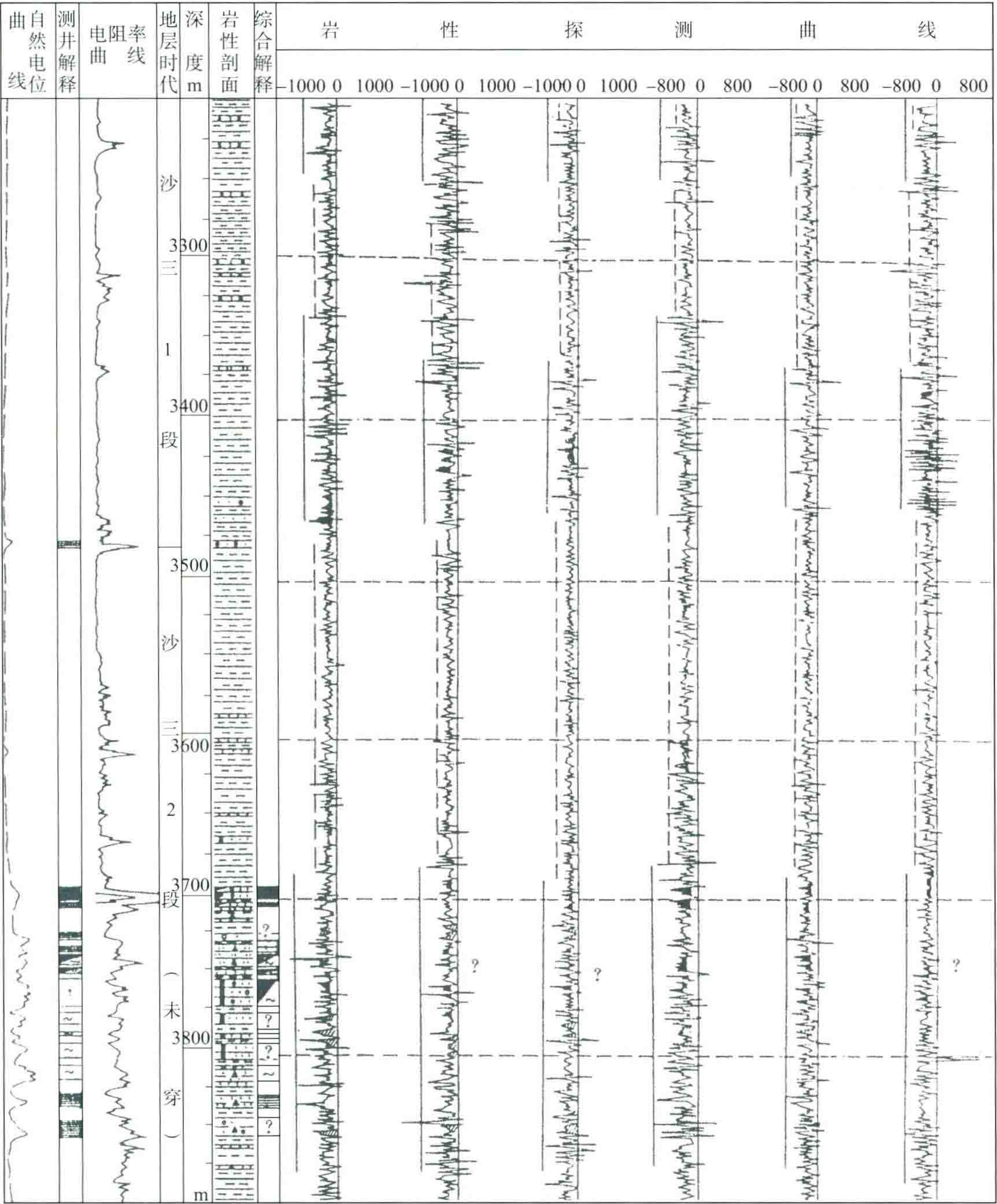


图 19　BS51 井 CYT-Ⅳ型仪器 1 m 步长重复测试记录

对比陈维权研制的这两种型号的仪器，不妨问一问，究竟是Ⅲ型能找到油还是Ⅳ型能找到油？为什么没有重复性的Ⅲ型也能找到油？

最近，又有人在西藏把岩性探测仪器搬到飞机上进行测量，不知道他们想测量什么东西。大概又会出现新的奇迹了。

七、国内外有关岩性探测技术的一些争论

关于岩性探测技术是否有科学道理的争论其实在国内外很早就存在。在 1989 年 3 月，中国地球物理学会召开的研讨会暨学习班上，煤炭科学院西安勘探分院物探所的寇绳武先生曾提交了一篇题为《从电磁

场理论对 PS 法原理质疑》* 的论文。该文旗帜鲜明地提出“PS 方法的几个主要方面在理论上是说不通的”。他指出以下 4 点。

(1)“电性界面对电磁波的反射不会在某个频率上产生幅度突变。因而,当连续变频时,无法达到分辨界面反射信号的目的。”

(2) Kober 博士的所谓“用趋肤效应的截频公式就能推算出与深度的线性关系模型”是臆造的产物。“电阻率是阶跃式分段函数,故反褶积是唯一的”的说法没有丝毫道理。

(3) 在 0～20 kHz 频域内,介电常数 ε 对波阻抗的影响很微弱,它对反射系数的影响很小。而 ∂ 大又是水的特有属性,因此直接找水的前提是不存在的。至于石油和煤,它们也不含有影响电磁波传播的特殊电性参数,因此直接找油找煤的说法也不成立。

(4) 绝对精度“6000 m 之内不论深浅,都达到 1.5 m 的探测精度”的说法违背了物理场“体积效应”的原则,是不能相信的。

在 1989 年有关岩性探测技术研讨会上,会议特聘著名地球物理学家顾功叙老前辈任 PS 仪器的鉴定委员会主席,要他先表态。顾老在会上说:“一种勘探方法的理论基础不明,机理也不清,怎么谈得上对仪器作鉴定?”同年 3 月 22 日顾老在北京的第二次岩性探测学习班的总结会上说:“我对岩性探测器的看法,已在今年地球物理学会春节茶话会上说过,我持怀疑态度。这里再重复一遍,有三点原因:

(1) 电磁波是不能在地下传播很深很远的,所以有人怀疑所利用的是大地电磁场在起作用。但是大地电磁场的分辨率是极低的。

(2) 地下深处,介质的组成结构是非常复杂的,大地电磁场一定也分布很乱,推断岩层层次的方法怎么会这样简单呢?

(3) 所谓我国已制成岩性探测器,是何情况? 仪器是服从于原理的,原理说不清楚,何来仪器研制?”[6]

我认为重温顾老的这些话,还是十分有益的。

中国地质大学的傅良魁先生是电法勘探专家,1989 年,他对 PS 方法基本上是肯定的。即使他文章中指出了“该方法也有相当多的不成功试例,理论上也欠严谨,可疑点颇多”,但是他的第一句话是“实践是检验真理的唯一标准,美国 GI 公司已经取得了相当好的成功实例,我国也取得了一定的效果”。[7] 这样,他就不加分析地肯定了这是值得加强研究的新技术。

由于人们在试验中发现 PS 方法与电磁波传播理论有矛盾,又寄希望从理论上来一个突破,于是引出了中科院空间物理所、清华大学、北京科技大学的学者们的苦心钻研新理论,千方百计来解释 PS 方法为什么有效。

文献 8 所说的“截频滤波器”大概是实现不了的,这已经在前面讨论过了。1994 年,该文作者又发表了依靠“倒谱方法”作反演的文章。[8] 这种方法恐怕也只有在基本没有噪声以及入射电磁场为已知的情况下,才能求得准确的反射系数。该文还寄希望于由“震电效应”来解释 Petro-Sonde 的直接找油可能性。

对震电现象的研究目前尚处于摸索阶段,我们希望它出现奇迹。但笔者以为,地震波本身是一次波,震电效应是二次波,后者是极微弱的,大概很难检测到。即使地下产生了震电效应,从油层回来的路上如果以电磁波方式回来,那么还是解决不了高频的强烈吸收及低频的分辨率不高的根本障碍。如果回来的路上以弹性震波方式传播,那么,其精度也只能与地震勘探相当,绝不会出现像 Petro-Sonde 吹嘘的分辨率那样高。

我们再来看看 SEG(美国勘探地球物理学家协会)的态度。1987 年,中国石油学会勘探地球物理专业委员会主任孟尔盛先生曾向 SEG 前主席 R. J. Graebner 询问过他们是如何对待 Petro-Sonde 这样的技术,为什么不发表 Petro-Sonde 的文章。回答是:“SEG 对于理论上不成立的 Petro-sonde,始终不刊登他们的广

---

* 此文引自中国地球物理学会于 1989 年 3 月在北京召开的岩性探测技术研讨会暨学习班的论文摘要。

告。几次GI公司想要在SEG年会上作报告，也不给他们上讲台的机会，也不收录他们的文章。”

我认为SEG的立场是十分鲜明的。时至今日，凡是询问到外国的地球物理专家有关Petro-Sonde的技术，一般都是持否定的态度。

而我们国内有一些人很热衷于这项技术。1993年，我国曾有人专门在美国想寻访Petro-Sonde的“专家”们，结果找不到这些人，他们已经销声匿迹了。而我国的“岩性探测”却还在继续发展，近年来更有新的创造。仪器不断更新，还有不少专家为其编写论文，或为其设计改进仪器。直到最近，还有6个单位在制造这种没有科学依据的“岩性探测仪”。真令人百思不得其解。现在是时候了，应该喊一声“岩性探测”可以休矣！

八、关于黑猫、白猫的争论

1992年7月，中国石油天然气总公司在涿州召开“全国非地震物化探会议”。在总结岩性探测的试验效果时，许多人认为效果很好。孟尔盛先生插话认为该方法没有理论依据、不可信。当时，引起在座的不少人的反对。有一位先生发言说：“岩性探测在全国成功的例子太多了，找煤、找水、找油都很准，是公认的一种找油的新技术，没有什么可争议的。即使目前理论上说不清，那么，只要用它能找到油，不管黑猫、白猫，抓到老鼠便是好猫。”

这次会议第二天，我在会上作了半小时的发言，讲的便是本文的内容。我还谈了关于Affinity重力直接找油也存在类似的问题。不少人也听不进去。有一位总地质师插话问我：“你认为不管黑猫、白猫，抓住老鼠便是好猫对不对?”我回答：“这在认识论里是一个感性认识和理性认识的差别问题。我们不但应该知其然，还要知其所以然。感性的认识只是从现象出发，并不一定是真理，而且可能是错的。你今天碰巧抓到老鼠了，明天可能就抓不到。所以我们应该分析事物的本质，上升到理性认识才行。”

在这次会上，我还就什么叫“符合率”作了解释，可惜我的发言没有引起这次会议的重视，许多人听不进去，在大会总结文件中对反面意见竟只字未提。

从Petro-Sonde多年来的争论中，我们是否可以总结些什么经验教训来。请大家看完我这篇文章后，客观地思考一番。

结语

(1) Petro-Sonde或岩性探测技术是没有任何理论依据的，其成果是不可信的。

(2) 本文从理论上指出该方法存在着5点无法克服的矛盾。对于1000 m以下的地层，凡是能够反射回来的低频电磁波，其分辨率太低；而分辨率高的高频电磁波却被地层吸收得微乎其微，这是一对不可克服的矛盾。

(3) 各种型号的岩性探测仪器所测数据既没有重复性，又无一致性，也无稳定性，甚至在一个点上同一个“深度”上读数，也是一个任意数。所谓波形有某些特征，仅仅是电磁波对不同的频段有着统计性的强弱差异的涨落所造成。这种强弱差异本身也是不固定的，谈不上反映地下的情况。

(4) 在实践中，解释人员对忽大忽小的随机曲线作了某种主观判断，致使本来极不可靠的数据产生了某种程度的“符合率”，再加上不适当的报道，造成一种舆论，认为它是一种“新技术”，其实只是安徒生童话中的“皇帝的新衣”。

(5) 在科学技术的发展道路上，对有争议的问题要允许不同意见的发表。只要大家抱着追求真知的态度，问题总归会愈辩愈明的。

参考文献

[1] 石应骏,刘国栋,吴广耀等. 大地电磁测深法教程[M]. 北京:地震出版社,1985.
[2] 刘洪. 截频滤波器可能的原理[C]//岩性探测技术学习班材料之三,1989.
[3] 袁业培,金文丽. 岩性探测法在油气勘探中的应用效果[J]. 石油物探,1992,31(3):102-111.
[4] 黄世矩. 岩性探测方法研究现状与前景[J]. 石油地球物理勘探,1995,30(S1):170-173.
[5] 陈维权. 空间源直接探矿仪在找油中的作用[R]. 北京:国家计委,北京:中科院能源研究所,1995.
[6] 顾功叙. 顾功叙名誉理事长在岩性探测技术研究会上的发言[J]. 中国地球物理学会会讯,1989,(21).
[7] 傅良魁. 岩性电测深法及其在我国的试用效果[J]. 物探与化探,1986,10(3)183-192.
[8] 刘洪. 利用天然电磁场高分辨探测地下油气水的可能性[J]. 地球物理学报,1994,37(6):828-835.
[9] 刘若谷. Petro-Sonde 法场源研究[J]. 地球物理学报,1993,36(1)113-120.
[10] 陈维权. CYT 型大地电场岩性探测仪的功能和测试技术[R]. 杭州:浙江石油勘探处,1989.
[11] 王文祥. MDY 型地电探测仪器简介[R],西安:煤炭科学研究总院西安分院地质研究所.
[12] Geophysics International Corp. The Petro-Sonde Service-data to aid in evaluating drilling prospects [M]. 美国 GI 公司技术说明书,1988.
[13] Petro-Sonde 地电探测仪简介[J]. 石油地球物理勘探:参考资料. 1986(118).

文章编号 301-2



关于岩性探测的争论



我关于 Petro-Sonde 质疑的文章发表后，当年引起的争论还真不少。

物探的老前辈顾功叙先生是不信“岩性探测技术”的。但是在那个“特异功能”盛行的年代，他也没有办法，只能在北京的 SEG-CPS 的大会上呼吁各国的地球物理专家帮我们来评判一下。

坚持拥护岩性探测的人们总是说：“原理不清楚的东西，只要效果好，就应该提倡”。石油部科技司的人还用“不管黑猫白猫，能抓老鼠的就是好猫”来批评我和孟尔盛老总。

直到最近，王文祥等还在发展这种“新技术”来作天然地震预报。

从今天来看，尘埃落定，Petro-Sonde 就是伪科学。本文的意义在于回顾过去的这一幕，从中吸取教训。

一、关于“岩性探测”当年引起的争论

我在“岩性探测可以休矣”文章的结论中说：

(1) 喧闹已久的 Petro-Sonde 或岩性探测是没有任何理论依据的。美国 GI 公司搞的 Petro-Sonde 是江湖骗术，而“岩性探测”则是我国某些好心人办的糊涂事。二者性质是不一样的，但本质上都是直接接收电磁场中不稳定的脉动噪声，其成果是不可信的。

(2) 从理论上说，本文指出该方法存在着 5 点无法克服的矛盾，见前面正文。对于 1000 m 以下的地层，凡是能够反射回来的低频电磁波，其分辨率太低太低；而分辨率高的高频电磁波却被地层吸收得微乎其微。这是一对不可克服的矛盾。

(3) 各种型号的岩性探测仪器所测数据既没有重复性，又无一致性也无稳定性。甚至在一个点上同一个“深度”上读数，也是一个任意数。所谓波形有某些特征，仅仅是电磁波对不同的频段有着统计性的强弱差异的波动所造成。这种强弱差异本身也是不固定的，谈不上反映地下的情况。

(4) **在实践中，解释人员对忽大忽小的随机曲线作了某种主观判断，致使本来极不可靠的数据产生了某种程度的“符合率”。再加上不适当的报导。只提其成功的例子。最后造成一种舆论，认为它是一种“新技术”，其实它只是安徒生童话中的“皇帝的新衣”里的那个光屁股的皇帝。(而我可能就是那个不懂事的、说实话的小孩)**。

(5) 科学技术的发展道路上，对有争议的东西要允许不同意见的发表。只要大家抱着追求真知的态度，问题总归会愈辩愈明的。

二、"岩性探测"技术在我国的发展过程

陈维权是浙江石油勘探处的一名测量仪器修理工，他看到1984年美国GI公司Petro-Sonde岩性探测的报道后，他自己也制造出一台直接找油的仪器。据说很灵验，但浙江石油勘探处的其他人不承认他的效果。一气之下，他到北京国家经委去告状。国家经委有人支持他，一个领导听他汇报后，立即把他调往国家经委，并由他们发工资。还下了一个文件，大意是"这么好的一种省钱的找油方法，你们石油部门为什么不推广使用？"

红头文件下到石油部，石油部只能开展试验，出钱让陈维权制造5套，分发到5个油田进行为期1年的试验。想不到1年以后，5个油田上报的试验总结交到石油部勘探司后，竟然都说："首先肯定岩性探测是一种先进的多快好省的找油方法，虽然目前还存在不少问题，但是还应该继续试验。"你说这可悲不可悲。

后来我看到五个油田的总结报告，发现每个报告都称"岩性探测"是一种新技术，它在判断含油层位与含油气深度方面都很有效。并且每个油田对如何根据岩性探测曲线的形态判断含油性方面，都有独创性地总结出自己的一套方法。其预报成功率在70%～80%。但是不同油田认为含油的曲线形态却是相互矛盾的：有的说含油气后是正异常，有的说是负异常；有的说含油气后是一个宽而厚的负异常，有的说是窄而尖的异常。

真是"奇哉怪也"，大概这是一般人都不敢"否定新技术"的缘故。

当时正是全国兴起"特异功能"的大环境下，各种"特异功能找油"的骗局层出不穷。全国对岩性探测的呼声很高，有6家单位在制造岩性探测仪器，包括清华大学电子工程系。中国科学院地球物理研究所又发表了Petro-Sonde岩性探测的"截频滤波器"理论文章。

他们还想"拉大旗作虎皮"，让地矿部总工程师顾功叙老先生为他们作技术鉴定，被顾老言正词严地否决了。

我不信那个邪，心想："用耳朵也能找油，还要我们这些物探作啥？""既然那么灵验，为什么美国人自己不用，到中国来帮我们找油？""无论从地震勘探理论到电磁波理论，都不可能达到如此高的分辨率和精度。"于是我决心揭开这个迷局。石油部勘探司的朋友给我捎来全部Petro-Sonde岩性探测试验文件和报告，才有了本篇文章的发表。

从今天看来，Petro-Sonde岩性探测肯定是一种"伪科学"，但是当时反对岩性探测是需要一点勇气的，1992年在石油部全国第一次非地震物化探会上，我们的孟尔盛总工和我遭到了许多人的指责。我也作好了思想准备去迎接各种挑战。

三、事后关于岩性探测的争论

1996年，我在《石油地球物理勘探》杂志第2期上发表了《对岩性探测技术的质疑》一文，立即引起了一场风波。有的同志们打电话向我表示支持和拥护。也有人写信来表示遗憾，或者与我争论。**其中西安煤炭工业部研究分院的王文祥先生最为措辞激烈。**6月6日就收到他的来信，全文如下。

李总：

您好！冒昧给您写信，请勿见怪。原因是愿意和您交个朋友，当然这一愿望是我个人一厢情愿之事。

中国之大竟有您这样一个穷理之人。今年5月份在京时，已听到朋友谈到您写的一篇文章，当时我并不在意。对待一个新生事物可以个人发表不同的看法。但今天上午，我办公室的唐方头高工（硕士）却谈起了此件事，并说您还是一个工程院院士，于是才萌发了给您去信的念头。不必考虑文中您之观点和看法，仅凭您文章24页和您的头衔，也愿和您叙谈一下。

1986年11月份，我只得到《经济日报》的一篇报道GI公司"petro-sonde"岩性探测仪的文章，就开始

转入该项技术的研究。你可到我单位图书馆查阅我的借书证，看我翻阅了多少资料，此其一。

您可来我办公室看我手头整理后的《六论岩性探测仪的技术可行性》文稿，16 开纸写的大约有15.6 cm厚吧。您可查看其中对未来该仪器做出后的有关技术预测。这是做仪器的理论依据，此其二。

您可了解一下和我一起共事人员的现身说法。1988 年开始在现场试验，1989 年煤炭科学院做了使用效果的技术鉴定。1990 年一部分人说出于良心发现离开了我。1991 年底，3 个研究生才说现在由以前的半信半疑到全信了，您再听听他们现身的目前说法，此其三。

今年 8 月份，我们依据“Petro-Sonde”原理，在 1990 年开发出的八方位候风地震仪将参加国际地质大会科技展。请您看看我们在另一领域开发该项技术的科研成果。“心系往来生死，眼装四面八方”这就是该仪器的功效。

不怪您不相信该项技术，我们在我们单位的领导眼里又值几分？那么好，煤炭系统为什么不推广等等。我们说什么呢，只能得出中国的专家学者只会 1＋2＝3。因此，本人“冷眼向洋看世界，真知灼见能几人”之感慨。本人 1982 年毕业，先后涉足地质界、物探界、地震界之科学领域，亦不过如此。

该种仪器我们正准备做 24 道，或 48 道，一次测量一条线。该项技术只待假以时日，慢慢被人们接收。我们不再“主动出击”了。

看了您的文章，知道您和所有的物探专家、无线电专家犯了一个通病，即对电场、磁场、电磁场、电磁波基本概念的不清认识，其原因还在教科书中。再深究即到麦克斯韦的两个假设：位移电流、涡旋电场。有关这一基础理论的讨论如您感兴趣，咱们可以仔细讨论。

您的基石——电磁波已不成立，文中之推导均是依据电场公式或磁场公式。您的推导、立论是对的，但是已张冠李戴了。这不怪您，因为到目前为止全世界的无线电专家，和通晓无线电理论的学子，均在糊里糊涂运用这一似是而非的概念。

西藏的飞行报告我们正在安排人编写，如果您感兴趣，届时可来西安指导。这次飞行只探测了1600 m、2600 m、3600 m、6000 m。但其解决的地质问题(地质、构造、侵入岩体)已初见端倪。届时肯定您会爱不释手的，因为我从您撰写的文章中看到了您对事业的执着。

千言万语，万语千言，船总有靠岸之时，最后以四句话做偈：

“是非本无理，名利亦非情，本来无一事，何必烦恼生。”

欢迎您来西安指导工作，观光！

压抑了十几年，一写起来就有些偏激、狂妄，还望您见谅！

顺祝工作顺利！

王文祥

1996 年 6 月 6 日

我当即给他回信如下。

王文祥同志：

你的来信收到了。从信里我看到了你的心情是十分激动的。我想大概是因为你长期以来为之奋斗的目标一旦被人认为是“不科学的”，因而气恼得很。我可以理解你的心情。

我在文章中从 PS 仪器的理论到实践已作了系统的分析。我认为我并没有错。希望你们在心平气和的情况下，也写出论文与我作讨论，甚至对我作批评，都是合理的。你信中提到当今全世界的无线电专家和学子均在电磁波理论上认识不清，那么，我真诚地希望你能发表你的研究新理论，这必将有助于推动科技的发展。

好！祝你愉快！

石油地球物理勘探局

李庆忠

1996 年 6 月 12 日

四、记我与王文祥的一次会面及讨论

1997 年 11 月 3 日上午王文祥路过涿州，到物探局我的办公室来辩论岩性探测问题。

首先他认为我们对物理学的知识是很浅薄的。他以熟悉“天地生、声光电”的学者的态度提出一系列奇谈怪论。

他说物理学中很多理论需要重新考虑，例如热力学第二定律是错的。热量不一定从高温向低温走，例如辐射热量就可以从低温向高温物体走。我对他说，这是他错误地理解热力学第二定律。热力学第二定律的应用条件是必须在一个独立的、孤立的系统内，并且不考虑化学反应及核反应的情况下才能成立。

热力学第二定律的正确表达是：“熵向最大的方向转移”。你若把一个电池的两极短路，凉的电池就会发烫。这并不违反热力学第二定律，因为如果把化学能量也考虑进去的话，电池里的化学能量转变为热能时，熵也是增大了。我们人吃了饭，获得了能量，身体就可发热。这也不是违反热力学第二定律，因为人吃了熵值偏小的食物。

王文祥又说：你们大家都搞错了一个基本概念，“电磁场不等于电磁波”。据说，这是他的岩性探测方法的重要理论基础。

他提出了一种证明：他绘了一个电路，一个电容与一个电感及电池串联，在电容里出现电场，但没有磁场，这里也没有电磁波。于是他说，麦克斯韦方程式也是错误的。

我向他解释说：电容里面如果只有静电场，没有电荷的流动，当然就没有电磁波产生。并且由于不存在自由静磁荷，所以没有静磁场。这也并不奇怪。

但王文祥不以为然，他进一步阐述他的理论：天上来的太阳风引起的电磁场入射到地里就转变成为一种粒子，这种粒子遇到地下岩性界面就产生反射、漫射，再相加，便成为他的岩性探测仪的信号。他说，这种粒子有一个圆形的头部，还有一条长长的抖动的尾巴。他绘了一个像蚯蚓一样的图，说这个头是粒子，尾巴是波动。他把这种粒子称作“𬧤”，这是王文祥自己创造的字，字典里没有。他认为这是他的理论中的最精锐的部分。

我告诉他，其实物质的波粒二象性早已在物理教科书中讲清楚了，并不是入射到地下才发生的。王文祥却认为我们所有的人都搞错了。

我仔细打量着眼前这个人，感觉到他不像是在有意骗人。不过他的思想过于自信和固执。这种思想可能营造一种科学上的新发现，但也可能因为固执己见而走向谬误。根据我对岩性探测仪的理解，我认为他大概是属于后者。我不客气地指出了他的缺点：对物理学的大胆怀疑是可以的，但是需要科学地加以验证。

我向他提出：即使你收到了岩性探测信号，你也无法标定它所代表的深度。

他搬了几个公式，其实还是大家熟知的电磁波的“吸收窗公式”。

公式 $f=K\cdot\rho/h^2$，他认为可改写成 $f=K\cdot\rho/(h+a)^2$

f 为截止频率；K 是一个常数，接近为 1.59；ρ 为电阻率；h 为深度；a 为一个附加常数。他在仪器里加了一个双 T 滤波器，其谐振频率为：

$$f=1/(2\pi\cdot\sqrt{C_1C_2R_1R_2})$$

当 $R_2\gg R_1$ 及 $C_2\gg C_1$ 时，f 主要由 R_2 及 C_2 决定。电容 C_2 是固定的，测量时改变电阻 R_2，于是就可以在地面上标定仪器的常数 a。在地表有 $h=0$，则 $h+a=a$，于是在以后测量时 R_2 改变了就可以推算深度。

这里他的错误是他把以上两个公式中的 f 混淆了。其实前一个是吸收衰减截止频率，后者是谐振频率，它们不是一回事。而且频率与深度也不可能是这样简单的线性关系。

接着他又吹嘘他的仪器效果如何令人信服，还说他已经能够用岩性探测仪作地震预报：用两个岩性探测仪作测量交会，他多次预报成功，得到好评。

我又提到岩性探测仪存在的读数不一致性，不可重复。王文祥说他新做的仪器重复性特别好，我不相信。他说将在新年里来涿州，将带来仪器让我亲自试一试。我说很好。结果从此再也没有来我这里。

五、清华大学电子工程系的来信

石油地球物理勘探编辑部并转李庆忠学长：

1. 1993年以来，我们对岩性探测仪有所了解。1995年年中，就拟将一些研究结果写出来寄往贵刊。今年方得以实施，本篇文章，是寄给贵刊的第四篇。

第一篇，是关于天然场源的测量分析。

第二篇，关于分层地电系统正演递推模型。

第三篇，关于逐层向下引入新层的反演迭代方法。

第四篇，PS方法的病态性及阵列反演方法。

前三篇都是为本篇服务的。第一篇已退稿，退稿意见已阅，谢谢。退稿意见中说，虽对岩性探测提出了质疑，但观点不明确。意见是对的，因为我们曾接触过岩性探测的发明者，并与陈维权先生有过合作，我们不想把问题搞得太刺激了。

李庆忠学长的大作已读，文中提到的“陈维权在清华大学电子工程系的一些老师的帮助下”的老师就是我们。但是，在“帮助”或“合作”之初，我们基于源于太阳风与地磁场和电离层相互作用天然场的思考，认定天然场为时变的、有涨落的，同时由于多径效应及入射场、反射场难以分离。所以提出，我们不对仪器原理负责，只按陈维权的技术思路做仪器，我们也不要在仪器的说明上署名。这样的观点我们多次重述过。

2. 李学长文中的Ⅳ型，也不是我们帮助研制的，他们可能采纳了我们的一些意见。1993年6月，阎敦实在十三陵召开的会上，我曾经发言指出，同一仪器，同一地点不同时间测量曲线不重复；不同仪器同一地点同一时间测量曲线不一致。并表示第二个问题可解决（也需要根本改进仪器的设计思想，且有构想，但未有条件实现）。第一个问题是解决不了的！不可能像万用表测电压、电流、电阻或像示波器测波形那样具有美好的重复性，但似乎应找到相似性。后来，相似性也难寻。

3. 我曾经针对陈维权的仪器写过两篇内部报告，去年7月已交陈维权。此外，少数几个人也看过。是在原理本身可行的基础上对仪器本身的问题，实现及理论进行的探讨。可惜，我无权传面世。

4. 应该强调，本次投贵刊的文章，即第四篇文章，不是针对哪一家特定的探测仪的，而是针对探测仪赖以产生发展的一般方法的。PS探测仪存在的问题具有一般性，李学长文章的主要观点，我是赞成的。如果李学长肯赏光，我十分高兴向他求教。

5. 已投的第二篇、第三篇，尚未见处理意见，希望能见诸于贵刊。因这两篇，甚至第一篇都是为本篇服务，与本篇呼应的。

6. 如果PS方法有科学的一面的话，那是因为所测的信号确实隐含地下构造信息，也因为使用解释人员确有一些经验知识。说其不科学，那是本文中明确指出的病态性。基于参考点的陈列地电反演方法，理论上能够消除病态性。也许是“山重水复疑无路，柳暗花明又一村”，阵列地电反演方法，在实现上价格低廉。当然，仍有若干问题待解决。

顺致问候。

清华大学电子工程系

六、我的复信

清华大学电子工程系：

你们的来信及稿件已由《石油地球物理勘探》杂志编辑部转交于我。谢谢你们对我的信任，将稿件也

寄给我一份。

我今年发表的对 Petro-Sonde 质疑一文的目的是为了说明 PS 方法是没有理论依据，也没有实际价值的。文中可能对有些问题采用了过激的言词，这也是本人的毛病，难改。在此，也恳请原谅了。从来信中获知你们帮陈维权改进仪器，其实并没有同意陈的探测原理，只是改进仪器而已，这点我了解了。但陈是到处拿你清华这块牌子作“广告”的，所以我在文章中点了清华的名。我本人是清华 1952 年物理系的毕业生，不希望伪科学的倡导者利用我校来扩大他们的影响。

你们的文章我还没有来得及仔细读。粗粗的看后，感到此文是没有办法解决 PS 方法的病态性的。因为电磁波的低频部分分辨率很低，高频部分又早已被地层所吸收。

所以虽然似乎理论上反演会在某种条件下有确定解，但实际上是做不到的。

如果要了解地下的情况，对天然场源而言，现代的 MT 方法已经达到了这个目标。我们应该去改进 MT 方法，而绝不是去改进不科学的 PS 方法。其他意见待我详细的看完你文章，推敲一下后，找机会再向你请教。

好！再见。

石油物探局　李庆忠

顺便请问一句：你们认为 PS 仪器到底测量着什么物理场？它工作在什么频段？为什么它不安天线，不接地线，却能够达到如此高的精度和如此深的探测深度？为什么它要比 MT 方法高明？

如果你们对这些问题也搞不清楚，那么我奉劝你们不要再帮 PS 去研究什么新理论了。这不会有什么好结果的，只能助长伪科学的气焰。如果你们对上述几个问题有所了解，则请你给我略告一二，助我一臂之力，增加对其骗人术的揭露依据。

相信你能站在公道的立场给我以支持。

好！再见。

李庆忠

1996 年 6 月 12 日

七、王文祥的最新理论贡献——2002 年他发表“电磁场的瞬论理论”

最近偶然从网上看到王文祥在 2002 年出版的《瞬论与天然电磁波法勘探——未来的地质勘探革命从这里开始》一书。

我好奇地读了读该书的内容。该书是他整个“核心理论”及“神奇效果”的总结。

他从物理学的基本粒子，波动与粒子的二重性，到电磁场与电磁波的基本概念，直到数学中“古数”及“三维数”(复数是二维的数，三维数的物理意义我搞不清，据说它等于 a+bi+cu)，以及由三维数导出他发明的“均数”。据说他的“均数”可以预报地震及直接找油。这一系列的“创新理论”使人莫名其妙。

王文祥不但能够轻易地直接找油，还能够预报天然地震的发生。他的**岩性探测** MDCB 型地震预报仪器能够用 3～6 台仪器交汇检测地震将要发生的经纬度。

据说在 1997 年 11 月预报北京附近 6 级地震，精确度达到震中位置只差 14.5 km。**我们没有听说有此事件，并且他没有预报地震发生的具体时间。这是 58 天以后他的事后诸葛亮**。

王文祥还搞起地震勘探资料的数据处理，他的 DDM 法处理后，可以在剖面里划分密度和岩性。真神奇！可惜这次也是没有原理的说明，也没有可靠的资料证实。

看了他这本书，我的感觉和 12 年前一样；“他不像是在有意骗人。不过他的思想过于自信和固执。这种思想可能营造一种科学上的新发现，但也可能因为固执己见而走向谬误。根据我对岩性探测仪的理解，我认为他大概是属于后者。”

这里我来总结一下他的理论错误。

(1) 物理学中的波粒二象性是把波动和粒子统一为一个事物的两个侧面。例如可见光和电磁波，它们既是波动又是粒子。而王文祥的“蹿论”理论却推出了“电磁场不等于电磁波”，认为电磁场入射到地下反射界面后，会产生一种天然电磁波(这就是他的理论基础)。他认为普通大地电磁法测量的是“电磁场”，有“体积效应”所以分辨率不高。岩性探测仪器测的是由地下反射界面产生的“天然电磁波”，而“电磁场不等于电磁波”，它们会以光速反射到地面来，可以不受“采样定律”及“电磁场穿透深度”的限制(这些都是他的原话)，所以分辨率特别高明。我认为他的这种理论实际上又违反了波粒二象性统一的物理本意。他把电磁场当作波动，把反射电磁场当做脱离了波动性质的类似“光粒子”，它们以光速反射到地面来(光速在地下的传播速度是很慢很慢的)，这便是他的根本错误。从地下来的电磁波不可能没有“体积效应”，也不可能不受“采样定律”及“电磁场穿透深度”的限制，因此也不可能有如此高超的分辨率。我再说一遍，“电磁场就是电磁波”，电磁波传到的地方就是电磁场。

(2) 在岩性探测所用的频段，2000～4000 Hz 的电磁波在地下传播时的速度并不是光速(大家知道光传播的速度只有在真空里才是最快)，地层里会变得惊人的慢，为 150～200 km/s，波长约为 2000 m，穿透深度不超过 200 m。这样的电磁波何来的探测高分辨率?

(3) 接收这个频段的电磁波的主要成分不是地下，而是天上。高空电离层，太阳风和地表的各种感应及反射电磁场便是岩性探测仪器所测量的所谓信号。但是巧妙的是，在同一个地点，你用改变频率的逐点测量却能够得到大致有相似性的强弱变化曲线，这便是人们上当的根源，以为是来自地下的某种反射信号(如文章 301—1 图 9)。其实这种信号是会随着天上电离层及太阳风的改变而变化的，所以才使同一仪器在同一个点上所测的曲线没有重复性(如文章 301—1 图 11～14、图 18～19)。加上这种信号本身是不稳定的，随着时间而有涨有落，没有固定的读数，更造成了曲线解释人员不得不加上主观意识。(如文章 301—1 图 15，五个油田试验对含油气标志得到不同的标准。)

(4) Petro-Sonde 的发明人是美国骗子，他们的骗术到了中国引来了一场“革命”。20 世纪 80～90 年代有 6 家公司不断制造推出新型仪器，不少高等学府，包括中国科学院地物所，都为该技术提出“创新的理论”。这真是咄咄怪事。我们物探的老前辈顾功叙先生是个讲实话的人，他是不相信岩性探测的人，连他也不得不在 1996 年北京 SEG-PGS 大会开幕式上呼吁 SEG 的先生帮我们来鉴别鉴别。另一位物探老前辈孟尔盛先生在石油部第一届“非地震勘探工作会”上，因为说了一句实话：“岩性探测方法不可信”，而遭到石油部科技司一帮人的强烈反驳。

(5) 这些话本来已经不必说了。Petro-Sonde 现在已经“尘埃落定”了。美国的祖师爷已经“人去楼空”。但是看到王文祥的新作，使我又想再声辩一下。回顾这一段历史，是否也能使人们从中得到某种启迪。

预报符合率不等于钻探成功率及特异功能找油



(1) 预报符合率不等于钻探成功率。

“预报成功率高”是人们为什么往往会对那些骗人的“新技术”上当的原因。

(2) 从飞机上直接找油的骗局。

美籍朝鲜人 Busuph Park 发明微轻子(ML)方法直接找油。

(3) “特异功能”找油——在那“特异功能”盛行的年代。

今天我们重新回顾过去的这段历史事件,应该从中吸取什么教训呢?那就是我们应该提倡科学精神,坚决反对伪科学。

一、预报符合率不等于钻探成功率

就在 1992 年的那次石油部“非地震”大型技术座谈会上,头天孟尔盛老总说了一句“岩性探测”没有科学根据,科技司的人当场插话说:“岩性探测在全国都有效果,成功率都在 70%~80%,不容置疑。”第二天,轮到我发言。我给坐在头排的石油部长和总地质师表演,我拿着 1 个分币说:“请你们今后在每口探井的开钻之前让我去作预测,我向天空抛这个分币,如果掉下来是正面,我预测它有油;如果是反面,我预报是无油。经过统计,我相信我的预报成功率必定为 50%左右(图 1)。”

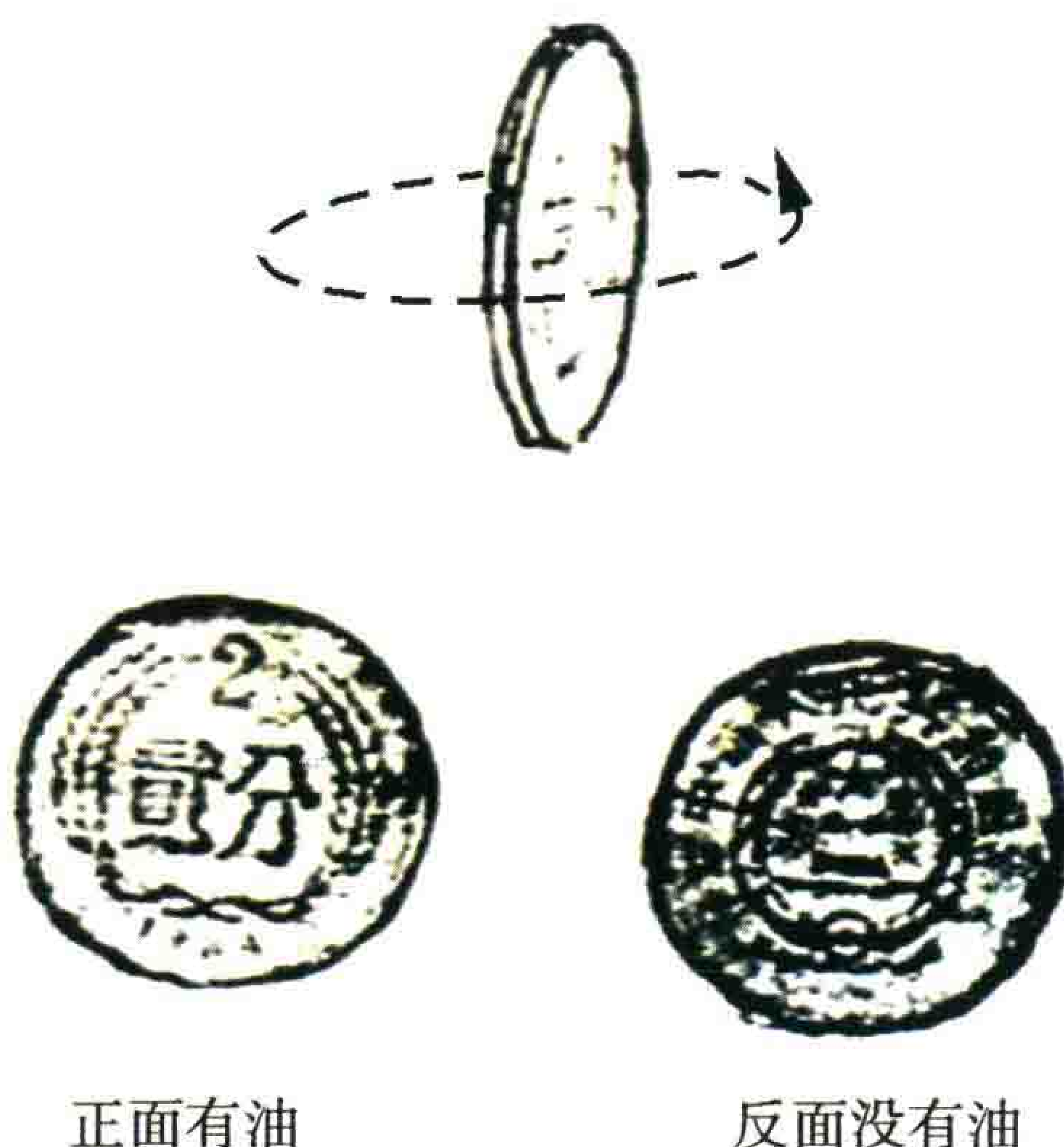


图 1　抛分币预报是否有油

这是数学里“概率论”中早就说明了的。

大庆油田的总地球物理师吴某听了我的讲话后不以为然，他对我说：“你讲的道理我不信。如果我把钻机向天空上打钻，预报成功率还能是 50%吗？”可见，他还是没有明白，“预报成功率”不等于“探井成功率”。

（一）随便乱猜的预测成功率（我的黑白魔方格）

也是在 1992 年的那次石油部大型技术座谈会上，我在发言中展示了我用计算机随机产生的一系列方格网，其中有黑色也有灰白色（各占一半），如下图。现在我预言：“把这张图蒙在任何一张构造图上，你在黑格中打井就会见油，灰白格中打井就没有油”，你信不信？且看实际试验。

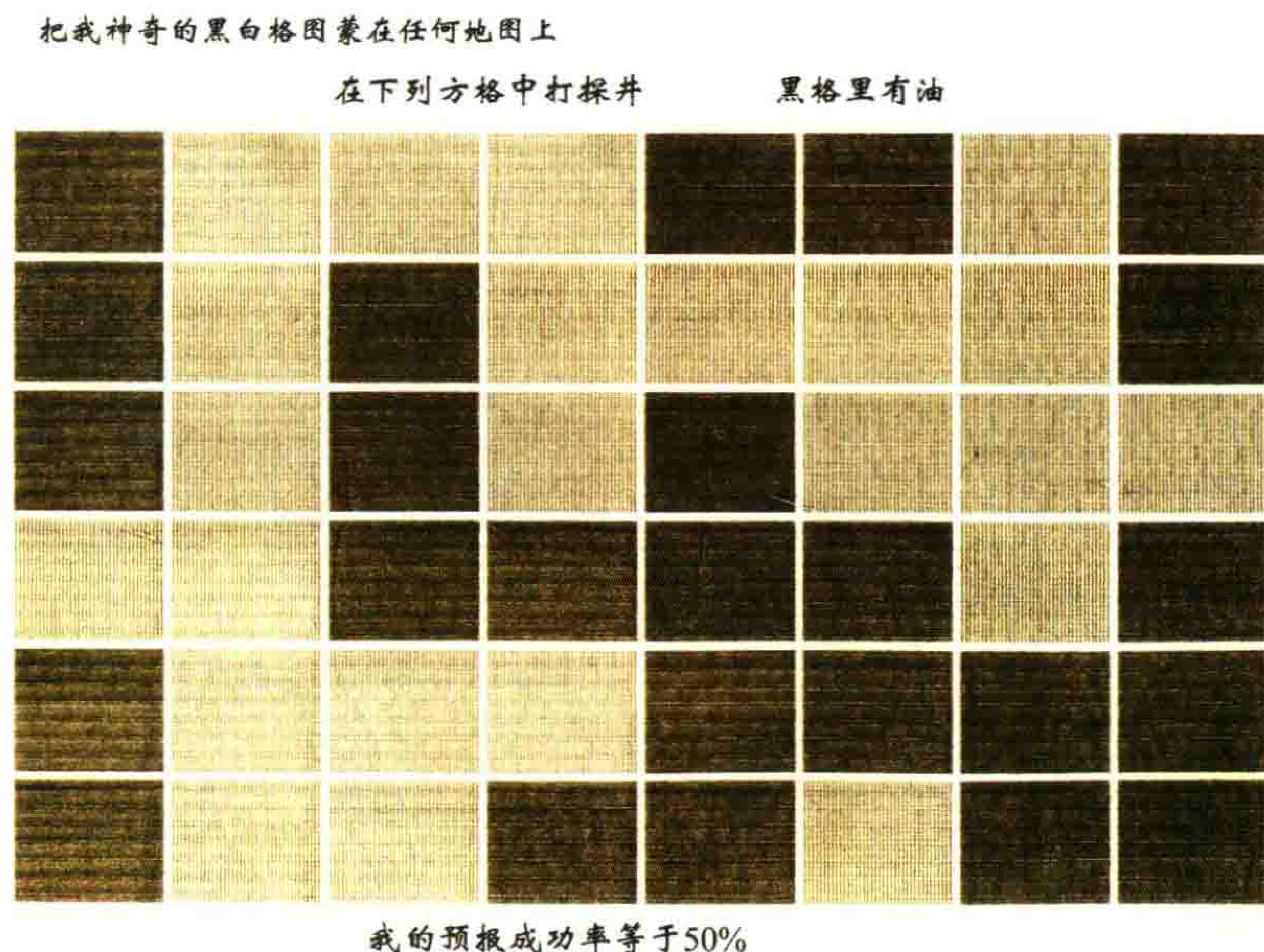


图 2　根据《全国油气田勘探图册》所作的黑白魔方格

我和勘探处的柯宗强先生使用《全国油气田勘探图册》做了多次试验。勘探图册上有各油气田的含油面积，将我的格格图（图 2）的右上角对准任意一幅油气田分布图的右上角。然后，统计我上述的预言的成功率，凡是黑格中含油面积超过一半的就算我成功，否则算我失败。统计结果列表如下。

试验号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
地区名	霸县凹陷	河西务构造带	饶阳凹陷	马西地区	义和庄周围	渤北地区	临邑中央带	红山咀一百口泉	南堡洼陷	黄骅拗陷
预报成功率	51.11%	55.56%	55.68%	55.44%	54.17%	61.84%	48.78%	55.00%	45.24%	48.79%

可见，对每个格格，你随便猜它有油或无油的预言成功率一般在 40%至 60%。在大数量统计的情况下，总的预报成功率将接近 50%。

这是“概率论”中的“大数定律”所说明了的。

地质学家可不这样想，地质学家可能对此 50%的“预报成功率”，误以为是实际的“探井成功率”。

他们听说某新方法直接找油预报成功率为 50%。好啊，用这个办法我打两口探井就有一口见油。多好呀。

不！这两种成功率完全是两回事，分属不同的两个概念。例如，把我的格格图放到一个完全无油的花岗岩露头区去打井，打完后，实际探井成功率为零。但我的预报成功率仍然是50%！因为我有一半的格格是灰色的，所以那里我预报没有油是对的。

所以当有一种新方法或"特异功能"作出试验，其预报成功率为50%时，请地质家不要轻信。50%的成功率，其实是概率论中的一种游戏。而地质家们往往以为50%预报成功率不错，我打两口探井就能有一口见到油气呀。

所以我们说，完全不科学、瞎蒙胡猜的方法，找油的预报成功率接近50%，如果他有一点地质知识，事先有一定的"先验知识"，那么成功率会到达60%～70%。

在不少油气预测的新技术中，一般都要使用已知钻井有油、无油的"先验知识"，来让计算机"自学习"。用神经网络或多参数模糊识别等方法，它们的预测结果表达为一条曲线，黑色的、白色的(或者正的与负的)各约占一半(黑白正负的基线是由解释人员自由选择的)。在此基础上，即使没有道理的属性指标(与含油无关的)，也会因为有了"先验知识"，他得到预报成功率会达到60%～70%。还有一些油气预测的成果图是平面的，图上差不多一半是红色的，一半是蓝色的(解释人员也可以调整其色谱使红色区域接近于"先验知识")，预报成功率更会大大地提高。

(二) 计算机算命

我不反对你有闲时去做计算机算命，我只是强调如果不深入研究各种信息到底是否与含油气有关，基础不牢，那只是一种"数学游戏"罢了。

对一种新的找油方法的有效性评估，不能只凭"预报成功率"来看问题。我们认为：第一要强调科学性，你的方法必须有科学根据，要讲道理，不得以"美国宇航局"或"美国原子能委员会"先进的保密技术为借口，不予告知，黑匣子也不许打开；第二，要用该方法"事后打井"的"钻探成功率"来衡量，看它是否真的有效。

我看过《康熙微服私访》的电视剧，片中康熙想把天下市集上的各种骗局写本书，加以公布，以为就可以防止老百姓上当了。他刚说完，就碰到一个穿着华贵的老乞丐来他店里买布。他的跟班(是个托)，就轻易骗走了一大批绸缎。让人捧腹大笑。

你看下面又是一个骗局。

二、从飞机上直接找油的骗局

微轻子(ML)力学与 测量方法 一九九六年六月 北京 Park Busuph 博士 ACSA/Asahi 网络	作者：Busuph Park Asahi 网络/ACSA 总裁 UCLA 物理学讲师 CATECH 讲师 IBM 实验室 研究员 Edison 公司核工程师 麻省理工学院：物理学博士 UCLA：理科学士，理科硕士

图3 Busuph Park 关于轻微子方法直接找油的宣传材料

图3是1996年美籍朝鲜人 Busuph Park(朴富燮)关于微轻子(ML)方法直接找油的宣传材料。你看他的头衔还真不少！

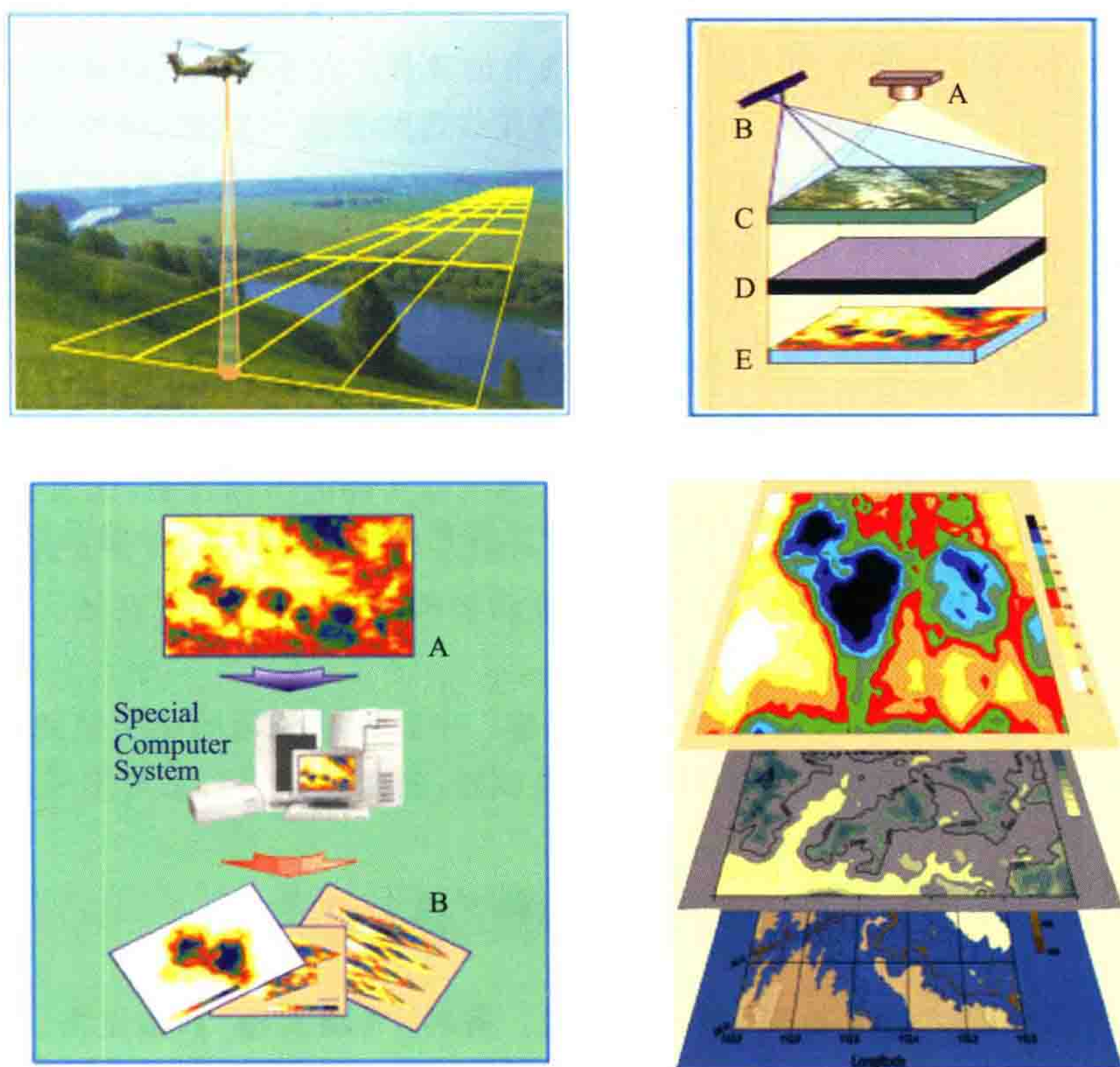


图 4　MLDS 找油流程

据说该博士是应用美国最先进的技术，制造出一种地下资源探测系统（MLDS）（图 4）在天上测量轻子，就可以寻找各种矿床，能直接找油，并计算出方位、储量等数据。

他本人大概是研究基本粒子的。基本粒子中中微子是可以在地层中长驱直入，因此，他萌发了用它来寻找石油。他想做试验实现理想，但又没有资本，就委托了丹东一个叫孟凡竹的人（任董事长）代他成立了"丹东锦江山辐射有限公司"。此人认识辽河油田的某领导及总地质师，就定下飞机，为辽河油田飞行寻找石油。经过一期的试验，花了上千万元，也没有听说有什么油田发现。但是辽河油田的总地质师却为该技术连连称好，我不知道好在什么地方。我从石油部勘探司看到该项目的总结报告，文字很简单，没讲什么道理，也没有指出哪里含油，只是附了长长的一张表格，列出了各观测点上的甲烷、乙烷、丙烷的数字。

我看这又是骗人的。

关于轻子直接找油方法之我见：

（1）轻子（lepton）是原子物理学中对基本粒子的一种分类方法。电子、正电子及中微子等，都归属于轻子。而质子、中子等重粒子归属于重子。朴富燮的 MLDS 直接找油方法，使用的都是原子物理学中的貌似先进技术的新名词。然而，它的理论基础是很成问题的。

（2）首先，该方法对使用什么轻粒子不加以说明。譬如说电子显微镜使用的是电子，X 光透视使用的是 X 光。众所周知，电子和正电子是带电粒子，它们走不多远便与其他粒子相碰，或被俘获。γ 射线也不容易穿透地层，自然伽玛测井便是一例。各种超级微小粒子，它们的寿命短得不得了，当然也走不远。只有中微子是可以在地层中长驱直入，走几十千米。但是中微子向什么方向走，走到什么地方，怎么能回到你的探测器，这却没有什么道理可讲了。这是本方法在理论上最不合理的、最薄弱的地方。

（3）其次，你的仪器装在飞机上，你怎么知道你收到的中微子来自什么方向？你怎么知道它与油气有关？所谓 Lepton Filters 大概属于他们的"技术秘密"吧！谁知是个什么东西。

（4）再有，我看到该方法为辽河油田所作的试验最终报告，其中没有任何实际测量精度与可信度的分析，却列出了甲烷、乙烷、丙烷……的含量表格。就像他从飞机上已经找到石油，并且作出了原油的组分分

析,使人感到很难相信。

(5) 相反,辽河油田的总地质师却对该 MLDS 方法倍加赞赏。在小报上说成功率多少,神乎其神。

(6) 1997 年里,该丹东公司千方百计想再打入我 CNPC 勘探市场。多次要求向 CNPC 领导进一步介绍该 MLDS 找油方法。当时,勘探局高瑞琪局长及赵化昆总工程师经多方征求意见,知道该方法很值得怀疑,所以加以阻拦了。

(7) 最近从 www.mlgeovision.com 网上下载的宣传材料和 1996 年 Busuph Park 的宣传广告基本上是一致的,只是老板换了人,公司换了名。Mlgeovision 的材料上也列举了他们首先在朝鲜做试验,但却避而不谈来中国辽河油田作过试验和有过什么效果。

(8) 最令人不解的是,他们对所有所谓成功的例子,都没有实际的图幅说明,光说在朝鲜取得了效果。而且为什么他们不到美国去试验? 为什么 SEG 杂志和 EAEG 国际会上他们没有上讲坛? 这些都使人感到疑惑。如果这 MLDS 直接找油方法很灵,它一定会轰动美国,绝不可能到现在还无声无息。这更说明此法不可靠。

(9) 2004 年,该公司又想来中国承包勘探石油的工作。中石油总公司的徐文荣助理发 e-mail 问我应如何对付。我对他的建议是:"如果这个公司来中国再想试验,我建议 CNPC 领导不要理睬它。"

三、"特异功能"找油——在那"特异功能"盛行的年代

20 世纪 80 年代末,是我国"特异功能"盛行的年代。各种"气功大师"八仙过海,各显神通。他们能"发功"包治百病,能隔墙推倒人,能从密封玻璃瓶中取出药片……据说当时有一名军队里的高级将领,他是"气功特异功能"的推崇者。我们科技界的钱学森先生,也曾鼓励发展"特异功能"(当然他对我国两弹一星建立过功勋,但这件事做得欠妥)。我很欣赏司马南和中科院的何祚庥,他们旗帜鲜明地极力反对,但也未能阻止"特异功能"的盛行一时。

于是,也就有用"特异功能"找油的能人出现。

这里,我想起一段故事。1990 年,有 3 个"神童"被邀请到总公司会议室,在众多的地质家及地球物理学家面前,当场表现"特异功能"。他们能在一般的地形地物图上绘出地下含油的范围来。可惜我没有参加,据在场的陆邦干讲,其中两个小孩迟迟不绘,第三个小男孩在众多的叔叔问他:"这里有没有油,那里有没有油?"约半小时后,他动手在华北的地图上绘出 6 个圈圈。其中有 1 个圈圈果真与苏桥潜山气田基本吻合。会场上有人赞叹称绝。我追问陆邦干他到底绘对了几个圈。结果被告知,3 个圈完全不对,有 2 个圈与含油位置有些靠近,其实只有 1 个苏桥是蒙对了。

事有凑巧,以上我和勘探处的柯宗强先生的试验中,我的黑白格格魔方图也正好在苏桥气田那里有两个格与含气范围大致吻合。

在特异功能风行一时的年代里,这种例子是不少的。

胜利油田地质处还"养着"一个姓张的合同工。他能够在一张地震剖面上绘出哪里有油。据说还很灵。他原先在青海是一个养路临时工,他生了一场病,病后获得"特异功能"。在他眼里,在煤田上方出现一片红色。于是他用此办法帮人找煤,很有成效,小有名气;后来发展到找油的本事也很大。

大概在 1992 年,胜利油田的总地质师把他请到油田来找油。开始只发给他一辆自行车,让他每天出去用他的"特异功能"来找油。他说自行车影响了他特异功能的发挥,于是油田专门给他配备了一辆小汽车,还给他涨了工资,转为正式工,并转了农村户口。每当油田新探井开钻前,也让他实地去看一下,预言哪口井是否有油,据说也很灵。第二年,胜利油田胜采指挥部叫他去作含油预报,他有的预报成功,但多数失败。所以人们又不相信他了,停发了他的工资。地质处的一些好心人,用自己的钱资助他继续他的找油事业。

大概在 1995 年,我回到胜利油田。地质处的一位姓任的朋友告诉我一个好消息:这个姓张的"预言

家”的本事见长，他已经在石油部通过专家测试。现在给他一条地震剖面，他能指出哪里会出油。真是神了。

胜利油田当时的总地质师还骄傲地以孟尝君自居，说：“我还养着一个‘特异功能’找油的人，这有什么，花不了多少钱，成功率还很高。”

其实这也不难，在我们的社会里，只要你存心想欺骗，总是有人上当的。

利用概率论中的游戏，“特异功能”的预报成功率总是接近50%。如果他有一点地质知识，或者到油田看一看，了解那里的地面的钻井设施，事先有了一定的“先验知识”，像Petro-Sonde的美国骗子那样，那么他的预报成功率会到达60%～70%。可惜许多人还不明白概率论的这个基本常识，不明白“预报成功率不等于钻探成功率”，就很容易上了当。

今天我们重新回顾的这段历史，应该从中吸取什么教训呢？那就是我们应该提倡科学精神，坚决反对伪科学。

文章编号 302

评艾菲微重力直接找油兼论 GONG 直接找油

1991 年开始，又刮起一阵用重力直接找油的“艾菲”技术的风。据称，此法在直接找油的成功率达到 70%～80%。

《中国石油报》连连用整版版面刊登“艾菲”的广告，标题常常是“实践是检验真理的唯一标准”。

该技术是由美国世界地球物理公司发明，用一台不准人打开的“重力仪器”，到中国与胜利油田的某个权威，合作开办了艾菲有限公司，开展了业务。一时生意兴隆，推广到各油田去找油，甚至在完成三维地震的工区也开展这种直接找油。

因此，我写了这篇质疑文章，批判了“艾菲”是一个骗局。

而 GONG 属于另外性质，后者只是对直接找油的“痴迷”。

此文 1997 年 4 月发表于《石油地球物理勘探》第 2 期，作者李庆忠。

摘　要

从 1991 年以来，在中国的油气勘探中掀起了一阵 Affinity System(中译为“亲和系统”，或音译为艾菲技术)的重力直接找油方法的浪潮。由于艾菲技术发明人不切实际的宣传，加上不少“好心”人的吹捧，把该方法说成是“一种精度很高、轻便、廉价、快速的直接找油技术”，认为该方法找油的成功率在美国可以达到 95%。我国一些有影响人士轻信了艾菲技术发明人的宣传，把该方法推广到全国一些石油探区。其实该方法在理论上是站不住脚的，所谓艾菲技术能直接测量与碳氢化合物有关的“微重力分量场”也是毫无根据的，需要我们在理论和实际上加以彻底澄清。

艾菲重力仪在一些油田所测量的实际数据的精度均很差，最终成果在交点上的闭合误差往往大于判断油气水的异常幅值。而且该仪器的测量重复性也很差——普查中发现的有利异常区，通过详查，有时甚至发生这个有利异常消失了。这样的仪器是不可信的。

我们根据该仪器现有的测量资料来判断，所谓艾菲技术基本上是一种精度很差的重力垂直梯度测量，根本谈不上是什么直接找油新技术。

俄罗斯的 GONG 与艾菲技术的性质不同，GONG 是属于一种探索性的试验。它的发明人并没有隐瞒自己的方法及观点，只是理论上似乎已误入歧途，判断“恢复重力异常”的主观性太强。

本文论证了地下砂泥岩的岩性频繁变化所引起的背景异常已大大超过了含油气所产生的微量负异常，因此一般情况下用重力直接找油是不可能实现的；直接找气也只有在气层厚、埋藏浅，时代新的情况下才有可能实现。

关键词

高精度重力勘探　直接找油　微重力负异常　万有引力　水平分量

一、艾菲技术的由来

美国世界地球物理公司(Word Geophysical Corp.)有位名叫 Lewis A. Manson 的人,在 20 世纪 80 年代发明了一种重力直接找油新技术——能够直接探测油气的重力仪器。他称之为 Affinity System(亲和系统),中文译为"艾菲微重力直接找油技术"。据说,"该技术在美国先后参与了 200 多口探井的部署,以高达 95%的钻探成功率赢得众多石油公司的信任"。

艾菲技术的发明人 Lewis A. Manson 在几篇报告中一会儿说他的仪器是一个"特殊密度仪",测量单位是"毫克"(1987),一会儿说他的仪器测的是重力场与碳氢化合物有关的分量场,测量单位为"艾菲"(AFI)(1991)。在理论依据方面,他一会儿说是测量油气藏的质量亏空(1991),一会儿又说他的仪器测的是基于与重力有关的核次作用(Nuclear Subforces)——一种被碳氢化合物增强了的原子里的结合键的力(1987),并试图将此力解释为自然界中的"第五种力"的存在。后来又说他测的是重力场 3 个向量场的微小分量,并创造了一个新名词:"微重力理论"。Manson 先生这一套前后矛盾的说法与做法,使人不明白他葫芦里到底卖的什么药。

艾菲技术和 Petro Sonde 岩性探测技术一样,对许多基本原理加以保密:它不讲仪器测的究竟是什么重力场,又不讲"艾菲"是个什么单位;既不让人们打开它的仪器,也说不清为什么它能直接找油。

对于目前用艾菲技术直接找油的实际效果说法不一,有欣赏它的,有怀疑它的。据艾菲公司自己宣称,在中国他们的成果的"探井综合部署成功率达 70%~80%,滚动开发中的成功率为 80%~90%"。然而,实际上我们调查的结果,其预报成功率只在 50%左右。注意,预报成功率 50%左右,实际上是"不可信"的同义词,这点笔者将在下面加以说明。

据说,美国世界地球物理公司的 Lewis A. Manson 先生是一位地球物理学家,但是我查询了整个 SEG 的地球物理学家的论文作者名单,却没有见到他发表过 1 篇正式的论文。又闻,"他对地球引力怀有特别的兴趣,曾在 1949 年发明了跟踪记录重力日变曲线的实验仪器,这些仪器可以说就是今天艾菲重力仪的前身"[1]。我这里查到他的两个发明专利。

第一个专利是 1981 年 6 月在美国登记的专利号 US 4271702。这是 Manson 先生发明的为测量重力场水平分量的仪器(图 1)。在该仪器中他使用了刃口式的支架。大家知道,20 世纪 50 年代,我们使用过的刃口式"水平磁力仪"早就被淘汰不用了。因为刃口的任何磨损,都会造成测量精度的降低,并且旋转时,刃口与刀架接触的物理过程,也极为复杂,不可能有精确的读数。利用这种刃口式支架,是不可能测量微伽级的重力变化。

Manson 先生更大的设计错误,是没有搞清楚什么叫"重力场的水平分量"。譬如说在我们测水平磁场时,是先把地球重力总合力的方向定义为铅垂方向,然后把水泡调整到中间后,才用刃口式磁力仪测出磁场的水平分量。然而,对于重力测量来说,重力是以下几种力的合力:如地球的引力 F,地球自转的离心力 C,以及地球外天体(月球和太阳等的引力,包括潮汐作用)的力 F',所以重力仪只能测定由 F、C、F' 的总合力,即通常所说的重力 G。

当人们将仪器(包括重力仪、磁力仪、经纬仪等等)的水泡调整到中间位置的时候,我们实际上是承认了总重力 G 的方向指向为"铅垂方向"。于是,垂直于铅垂线的平面就被定义为"水平面"。一切水平面中的重力分量自然都等于零,即使精度再高的重力传感器,也无法测定其中任何一个水平分量。

由此可见,人们可以测定磁场的水平分量却不可能测定重力场的水平分量。当然,如果使用一架重力扭秤,那么是可以测量重力场的水平梯度或垂直梯度,这是因为扭秤中有相隔一定斜距的两个重力传感点。

所以我的看法是，Manson 先生关于测量重力场的水平分量的说法本身是基本概念上的错误。对于一般重力仪测量来说，只要水泡调到中间位置，水平分量永远等于零，与仪器放置方向无关，重心永远严格地位于刃口轴的正下方。

如果一定要测重力场的某一个分量，则必需除了铅垂方向之外，再另外寻找一个参考坐标轴。譬如，先计算出当地的"大地水准面"的偏斜角度和方位，然后用观测天上的星体（或太阳位置）计算出地心的准确指向。再把 Manson 先生的刃口刀架的轴严格地调整到垂直于这个指向的位置上，才能粗糙地测量重力场的某一个分量。否则只要刃口轴向稍有偏差，所测得的水平分量只是刃口轴偏斜引起的误差。

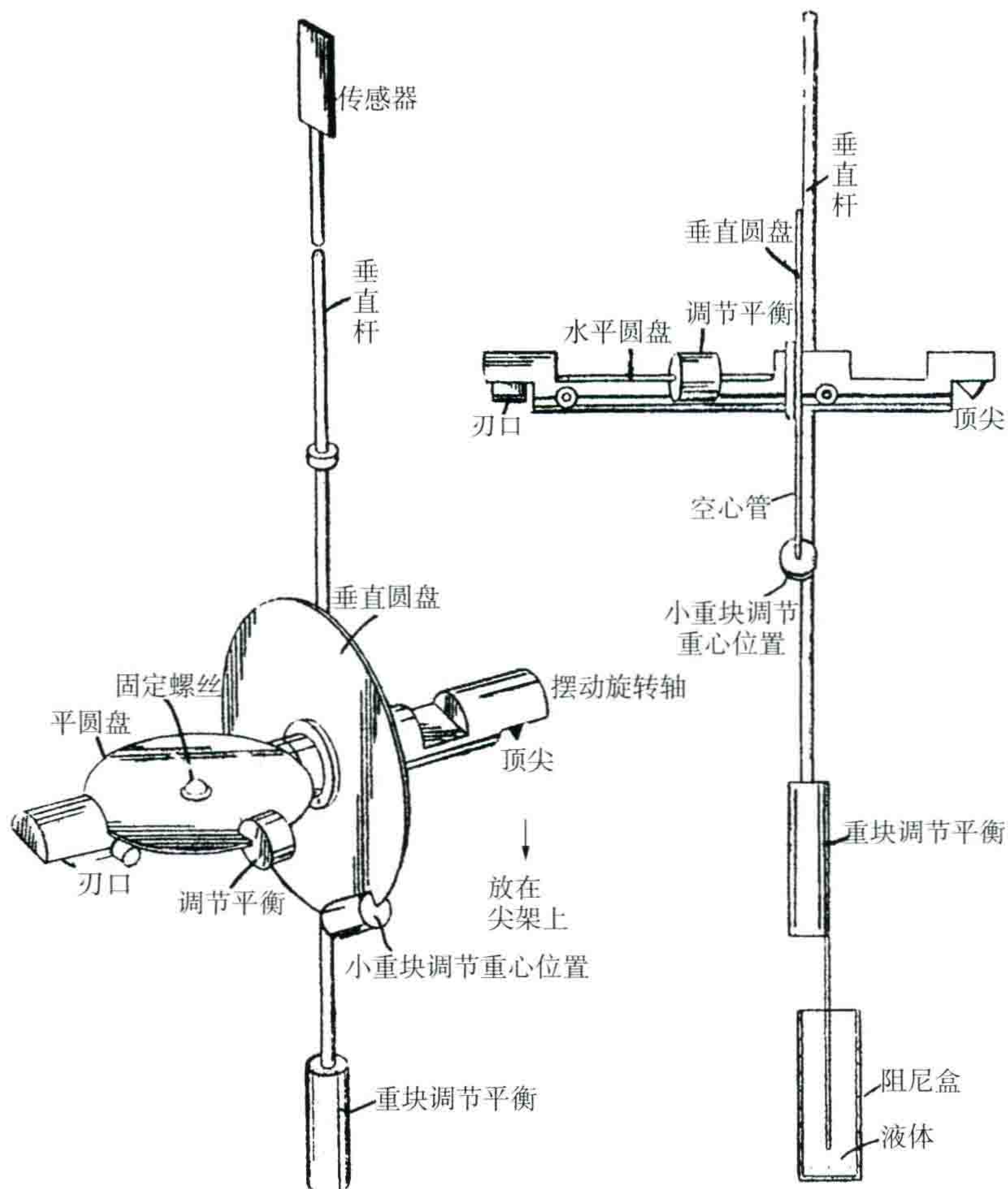


图 1 Manson 先生的测量重力场水平分量场的传感器

左为正视图；右为侧视图

如果把他的刃口仪器架好后放在一个点上不动，那的确会随着时间的推移，也会测到与 F' 的某些水平分量的变化（但是决不包括各种矿藏的引力分量，因为这类分量是不会随时间而变化的）。但是这样的测定误差会很大，所测数据也没有多少用处，因为它是与起始调水泡的位置有关的。如果用这种仪器到野外各点上去测量，只要每次把水泡调整到中间位置，其水平分量又恒等于零，所以它是没有实际用处的仪器。

在这里我必须指出，艾菲公司总工程师董冬先生关于重力分量场测定的说法也是犯了同样的一个错误。他的文章[2]只是学着 Manson 先生的说法而已。

第二个专利是 1981 年 9 月在美国登记的专利号 US 4290307，为重力测量仪器，见图 2。

图 2 实际上是液相浮力平衡感应系统的艾菲重力仪的雏形。这个专利并没有说它测的是重力分量，只是说用液体浮筒来代替金属弹簧来测定重力 G，便能避免由金属弹簧重力仪带来的弹性疲劳的"掉格"现象，使重力测定得更可靠。这倒是有一定的道理。但是这个设计十分粗糙，它使用了一系列的支架及滑

槽，加上机械杠杆的放大，组成了读数绘图系统。这种设计肯定也是不行的，滑槽中的摩擦力就会使整个测量精度降低。液态浮筒的思路倒是不错，但浮筒的温度、气压变化对重力测量的影响一定很大，很难把重力加速度测准。此外，浮筒及升降杆与罐口的摩擦及碰撞也会造成很大的测量误差。所以 Manson 先生在 1981 年 9 月获得专利以后，他的重力仪就从来没有胜过工业界广泛应用的拉科斯特重力仪。

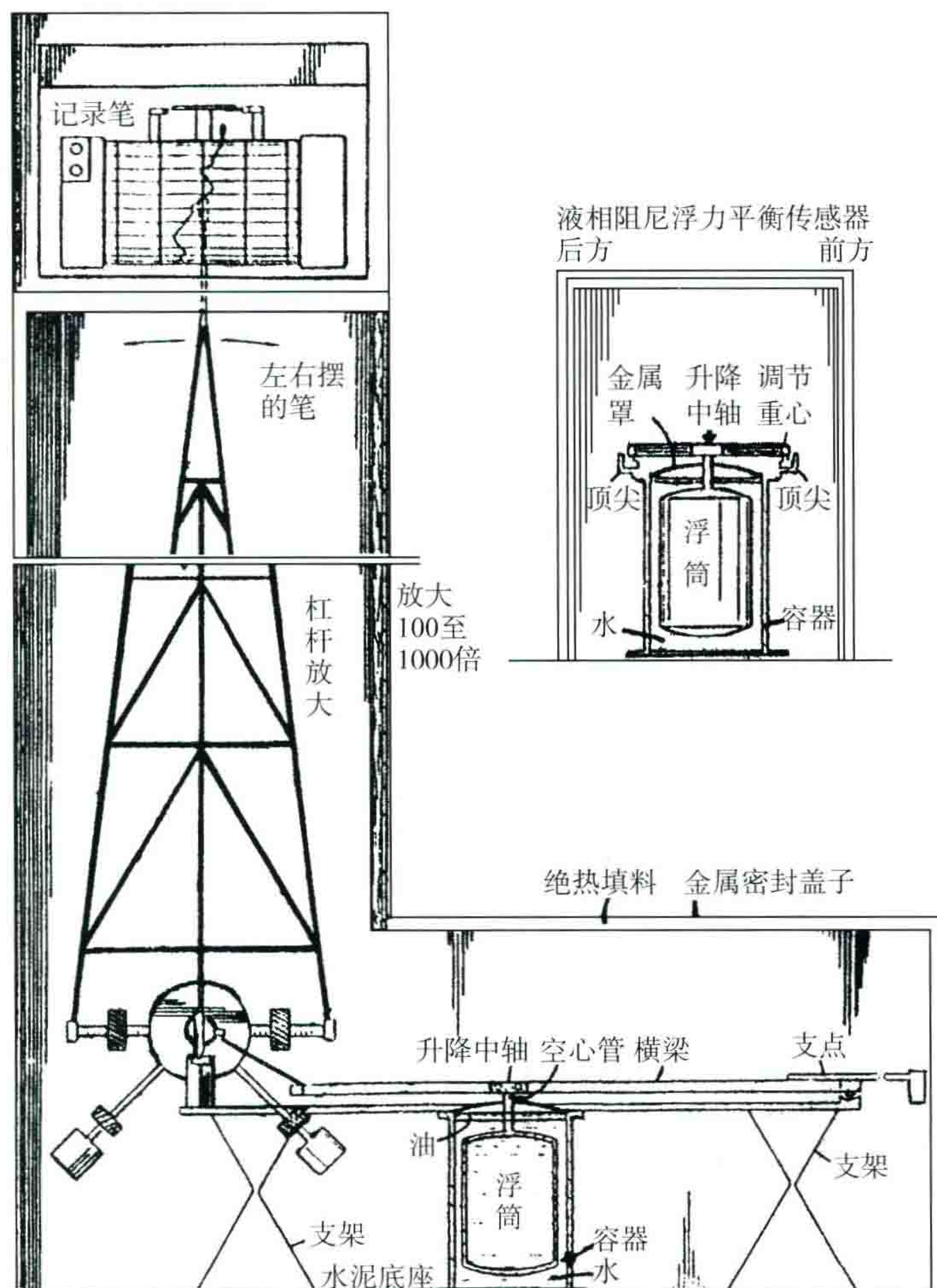


图 2 Manson 先生的重力测量仪器

在无声无息地过了几年之后，Manson 先生大概又改进了他的仪器，首先把杠杆放大绘图系统改成电子放大线路（误称为电子枪），再加上简单的计算运算部件。我估计他在这里采用了上、下两个传感器（两个浮筒），组成一个垂直梯度仪（这点他至今不予公开），使他的仪器稍微有了些稳定性。于是，他便设法把这种仪器投向探矿及找油方面的应用。

1985 年他把改进了的仪器命名为 Affinity System，即“亲和系统”，就是目前的“艾菲”技术。他声称此仪器由于采用了“液相阻尼浮力平衡感应系统”，并且加上两台仪器的日变校正，就能使重力测量精度比拉科斯特重力仪还要提高很多。然而，他从来也未提供他的仪器与拉科斯特仪器的精度的比较结果。此外，他诓称他的仪器测的是直接与油气有关的微重力异常分量，所以能直接找油。1987 年，他又把他的重力仪故弄玄虚地改名为“特殊密度仪”，说这种仪器可以专门测定碳氢化合物的存在。同年，他还发表了一篇文章，说了一套令人莫名其妙、难以置信的引力场的理论，[3] 对此有必要加以剖析。

二、艾菲技术直接找油的理论依据

1987 年，Manson 所创造的新理论的要点是：“分子结构中的电磁键，是由很微小的原子间的电流建立

起来,它是双极的。而引力值主要是由原子内部的核键所决定的。当核键组成了物质时,如巨大的地球,由其产生的巨大的场,有一个剩余作用力场从地球大小的大量原子中释放出来。这个剩余场就是我们通常所称的引力——一种单极力。"[1]这些话作为一种"学说"或者"假设"当然是允许的,但需要有理论及实验加以证明。

他又说:"碳氢化合物,它和它的极微小的亚粒子 Sub-Parts 对包含在地球释放的单极力中的某些成分有着奇妙的反应"。又说他的仪器测的是"基于与重力有关的核次作用(Nuclear Subforces)——一种被碳氢化合物增强了的原子里的结合键的力",并试图解释为自然界中的"第五种力"已被他们发现(注:世界上目前仅发现四种力,即引力、电磁场力、微观世界的弱作用力及强作用力)。[1]

为了解释他的理论和牛顿万有引力定律之间的矛盾,他引用了美国普渡大学的 Fischbach 先生和美国布鲁克海文国家实验室的 Samuel Aronson 先生的一项自由落体试验:在真空塔里,发现一个一磅重的铜球和一个一磅重的油脂球同时往下掉,结果每次油脂球都要先于铜球落到塔底。于是 Manson 先生解释说:"地球的引力透过碳氢化合物时增强了它内部的环行能量流,它反过来增强了键合力,使碳氢化合物产生一个较高的密度(特殊重力)……"[1]

最近,据中国地质大学王宝仁教授查询,有关第五种力的报导,已在 1991 年日本第六届广义相对论讨论会议上正式被否定。并且 Fischbach 先生也已承认,他的油脂球先落下的结论不可靠,是在测量误差范围之内,后来也未能重复证实,所以是站不住脚的。

而 Manson 先生却仍然根据这套理论建立他的"特殊密度仪"理论基础:"当地球中任何埋深的碳氢化合物位于该仪器下方时,都会造成这个浮筒在液体中下降——其位移量和碳氢化合物的沉积厚度成正比。"[1]

在用这种特殊密度仪对几个地区作了试验后,他就编造了一套在美国一些石油公司经过 200 口探井的验证,他的仪器的预报成功率已达到 95%的神话。

我想,如果真是如此,美国的石油勘探界早就会引起轰动,早就有大批的论文见于报刊了。可是很遗憾,Manson 先生的新发明在美国无人问津,而在 1991 年,终于找到了中国这个大市场。

三、艾菲技术的新发展

1991 年,美国世界地球物理公司初来中国是作演示性质的,首先在胜利油田及吉林油田做了两片测量成果。成果图中正、负异常各占一半,当然至少有 50%预报符合率,不少人就误以为它是了不起的新技术。更有诱惑力的是,它当时要价不高,也就不管它是否有理论根据,测量的什么物理场,在某些"好心"人的推波助澜下,在中国勘探市场中掀起了一股热潮。

尤其是 1992 年,胜利油田有一位颇有影响的人物,租用了艾菲重力仪,并与美国世界地球物理公司联手,开办了中美合资东营艾菲石油勘探有限公司。该公司的总工程师董冬先生为"发展"艾菲技术不遗余力。他比较聪明地回避了 Manson 关于"原子内部的核键产生了引力","碳氢化合物的亚粒子对单极力有着奇妙的反应"以及"第五种力的存在"等虚假的理论依据,而是结合了前苏联及美国关于重力直接找油的各种说法,归纳了一个"微重力亏空理论",并且巧妙地穿上这种"新鞋"又走在"艾菲"的"老路"上。他仍旧宣传艾菲重力仪能测量"分量场",并断言此法"告别了传统的重力测量"。他坚持"艾菲值愈高,代表地下重力亏空愈大,油气丰度愈高"的说法,却从不提供任何证明:为什么重力仪读数增高却反映了地下质量的亏空。

1995 年 7 月,该公司为了更加扩大其影响,在山东威海市邀请了各石油探区的有影响人物参加一个"全国微重力油气勘探技术研讨会"。还在《中国石油报》上大登广告,赢得一片赞扬声:声称艾菲技术是"一种全新的勘探技术,以其特有的高成功率的魅力被誉为直接找油气向新坐标";"是重力勘探技术发展至今的最精密的形式";"能够直接检测油气丰度,圈定含油范围";"能够少投入,多产出,有着重要意义"等。[9]

迄今为止,国家浪费在这个项目的投资(勘探加上开发两项),总数估计已超过数千万元,遗憾的是,目前还有人推崇这项技术。这个教训,发人深省。

四、重力直接找油的可能性

本人有幸曾从事过多年重力勘探工作。主观上说,我希望有一天能够实现重力直接找油。然而,多年来的实践告诉我,重力直接找油是十分难以实现的,重力直接找气也仅仅在特定的条件下才有可能。

自从牛顿发现万有引力以来,我们对引力场的客观认识虽然还有许多不清楚的地方。例如:对引力场的本质的认识还很差,引力场的传播介质是什么,引力场的传播是否需要时间,传播中有无吸收及衰减等等一系列问题,目前还没有正确的答案,人们对引力场的理论研究的确尚有待深化。但是除微观世界以外,在宏观世界中,从天体运行(除了黑洞及中子星内部的情况以外)到我们日常生活中的各种物体的运动规律,一直还没有发现牛顿万有引力公式有什么不正确之处。这是一个基本事实,脱离了这个基本事实,我们就要慎重地问一个是否真有道理。

为了解释用重力可以直接找油,发明"艾菲技术"的 Manson 先生和发明"GONG"的米哈依诺夫先生都要推翻牛顿万有引力定律。尤其奇怪的是,他们都千方百计地要假设:"唯独碳氢化合物可以对万有引力起到奇妙的作用",这是很难使人信服的。

在这里,我们有必要还是从牛顿万有引力定律出发,作一些计算论证。

许多涉及重力直接找油的文献,几乎都夸大了地层含油气后的密度差,而忘记了油气是存在于地层微小的孔隙之中。因此除了考虑油气与水的密度差之外,还应乘上一个孔隙率值。严格地说,还要再乘上一个含油饱和度值(典型油气层的含油气饱和度最多为 70%~80%,因为岩石颗粒之间总会有一些束缚水不能排出)。只有在这种情况下才是地层含油后的实际密度差,即:

$$实际密度差=(地下水密度-地下油气密度)\times孔隙率\times饱和度 \tag{1}$$

此外,地层含油与含气的情况差别很大,应分别讨论。有的文章中找的是油,密度差却列举了气的数据就不合适了。表1中列出重力直接找油的依据——地层含油后的实际密度差 $\Delta\sigma$。

表 1　地层含油后的实际密度差

地层年代	孔隙率(中值)/%	轻质油密度 0.75/(g/cm³)	中质油密度 0.85/(g/cm³)	重质油密度 0.95/(g/cm³)
第四系	35	0.084 g/cm³	0.056 g/cm³	0.028 g/cm³
第三系	25	0.060 g/cm³	0.040 g/cm³	0.020 g/cm³
中生界	15	0.036 g/cm³	0.024 g/cm³	0.012 g/cm³
古生界	8	0.019 g/cm³	0.013 g/cm³	0.006 g/cm³

由表1可见,以中质油为代表,华北地区第三系油层的实际密度差一般仅为 0.040 g/cm^3 左右,古生界含油层密度差仅为 0.013 g/cm^3。有人列举 API 值为 60°的轻质油的密度差可以很大。实际上这种油是高度气化的凝析油,很少见,并且大多出现在深层。而深层的孔隙率又很小,其密度差也不会很大了(寻找这样的凝析油可以当作找天然气那样,将在下文加以讨论)。

如果地下有一层密度差为 $\Delta\sigma$,厚度为 ΔH 的无限大平板层,它在地面所产生的重力异常 Δg 可用如下近似式表示:

$$\Delta g=2\pi K\cdot\Delta H\cdot\Delta\sigma \tag{2}$$

式中,K 为万有引力常数。重力值单位为微伽时,$2\pi K=41.8$。若假设上述平板层为二维薄层时,则式(2)可写成:

$$\Delta g=41.8\cdot\Delta H\cdot\Delta\sigma\cdot(\Omega/180^\circ) \tag{3}$$

式中,Ω 为油藏对上方地面测点的张角。当油藏无限宽时,张角 Ω 最大为 180°,此时,式(3)即等效于无限大平板层公式(2)。

以华北地区的情况为例,油层平均厚度为 10~30 m。假设厚度为 20 m,第三系原油密度为 0.85 g/cm^3,地下水的密度为 1.05 g/cm^3,孔隙率为 25%,饱和度为 80%,则依据式(1)计算的有效密度差

为 0.04 g/cm^3，若假设油藏埋深为 2 km，宽度为 4 km，则造成的重力异常为

$$\Delta g=(41.8\times20\times0.04)/2=16.7\mu Gal$$

此例中，因为油藏对上方地面点的张角 Ω 最大为 2×45°=90°，不是 180°，所以要除以 2。图 3 是这个理论模型的数值计算结果。

由图 3 可见，这个微弱异常是很难被发现的。因为目前重力精查最好的精度也只能达到 ±20μGal。可见有关利用艾菲技术在胜利油田草桥稠油区有很好效果的说法，是不可思议的。

下面看一看地下含天然气的情况。在常温常压条件下，天然气密度一般是空气密度的 0.7 倍左右。但是，天然气埋藏在地下时，由于高温，主要是高压的影响，而具有较高的密度。根据斯伦贝谢公司的图板，天然气在地下的密度经验数据如表 2 所示。

表 2　天然气密度与埋深的关系

埋深/m	500	1000	2000	3000	4000
天然气密度/(g/cm^3)	0.06	0.12	0.18	0.22	0.25

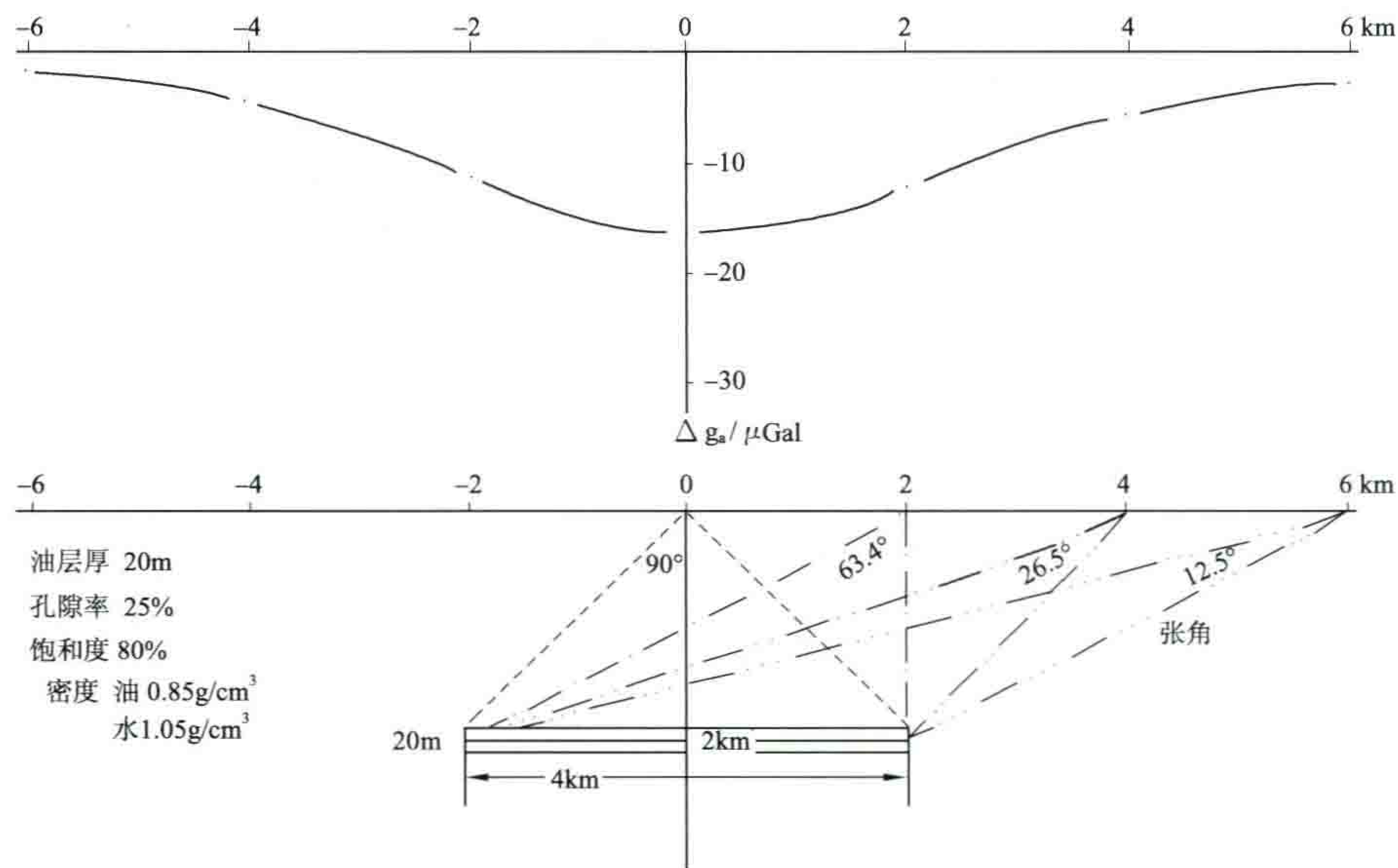


图 3　地下 20 m 油层引起的理论异常

青海东部涩北地区的天然气藏，是一个很特殊的类型：巨厚的、疏松的第四系地层富含有机质。由于第四系地层的孔隙率很大，因而实际上没有一个严格的盖层。此外，还由于生物成因的天然气，直到今天还处在继续生成、渗漏、运移、补充的过程中，从而形成了一个巨大的重力亏空。青海的勘探人员在涩北的天然气藏上，用高精度重力仪测到一个−1.6 mGal 的重力低，[12]这是重力直接找气的一个成功的例子。

但是，在我国东部压实成岩的地层中情况就不同了。一般压实成岩的地层中，“烟筒”中的碳氢化合物是极其微量的，其含量常常只占孔隙中的极小部分(万分之几)。因此，油藏上方烟筒现象(晕)的低密度效应只是在极新的地层(N+Q)及埋藏很浅的天然气藏里才有着明显的气体扩散、密度降低。

还有不少人用气田上方地震纵波速度的降低及“时间下拉”现象来说明“烟筒”的微重力效应(俄罗斯的 GONG 理论中就是这样说的)。但人们忽略了地震纵波在埋深浅的砂层中含气后的速度降低量，以含气饱和度 3%～5%时为最明显，10%时降至最低点。所以地震勘探中的“低速、亮点”有时并不具有工业价值。因此，地震剖面的下拉现象，也并不一定说明整个烟筒里的地层密度下降很多。

此外还要指出，明显的地震纵波速度降低及时间下拉现象，只是在极新的地层(N+Q)及埋藏很浅的天然气藏里发现(如青海柴达木的第四系及新第三系，以及莺歌海的新第三系地层中)，而近年来在艾菲公司的工作区域内一般还没有这种条件。

再以华北为例。根据表 2 提供的数据可知，在新生界埋深 2 km 的地层中，气的密度为 0.18 g/cm^3，地

下水的密度为 1.04 g/cm³。若孔隙率为 25%，含气饱和度约为 70%左右，则据式(1)计算的含气层的密度差为 −0.15 g/cm³。可见在华北地区，埋深 2 km、宽 4 km 的 20 m 厚的含气层所引起的重力负异常为 62.7 μGal。这样微弱的异常已经大于重力精查的均方根误差，理论上是可以被观测到的。但实际情况是，这样微弱的异常有可能被淹没在岩性变化造成的背景异常之中。

五、岩性变化引起的重力异常

许多研究者忽略了这样一个事实：岩性变化引起的重力异常要远大于地层含油气后引起的异常值。我们先分析一下砂岩与泥岩随不同埋深的特性。图 4 右方是美国墨西哥湾地区砂岩与泥岩的密度分布规律。从图中可见，同一深度上的砂岩与泥岩的密度差有大有小，浅层规律不明显，中深层普遍是砂岩比泥岩密度高，其密度差可达到 0.1 g/cm³，而 12000 ft 以下又接近一致。图 4 左边是砂岩、泥岩的声波速度分布规律，其浅层砂岩、泥岩差别不大；5000 ft 以下，一般砂岩速度比泥岩高 800～1200 ft/s，即 240～360 m/s。

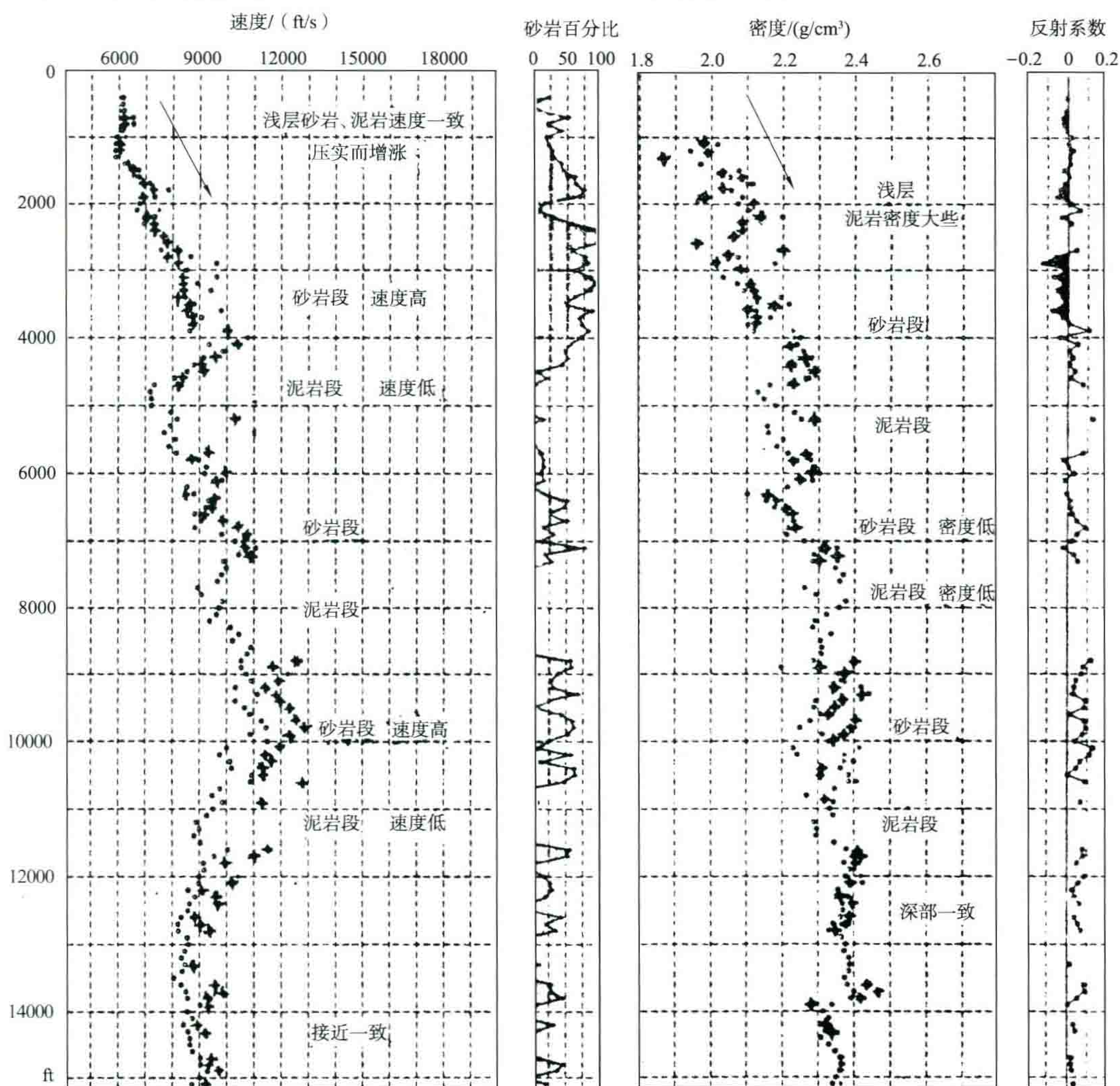


图 4 墨西哥湾的砂岩、泥岩特性分布规律(引自 Seismic Lithology，1982)

图中：• 表示泥岩；× 表示砂岩

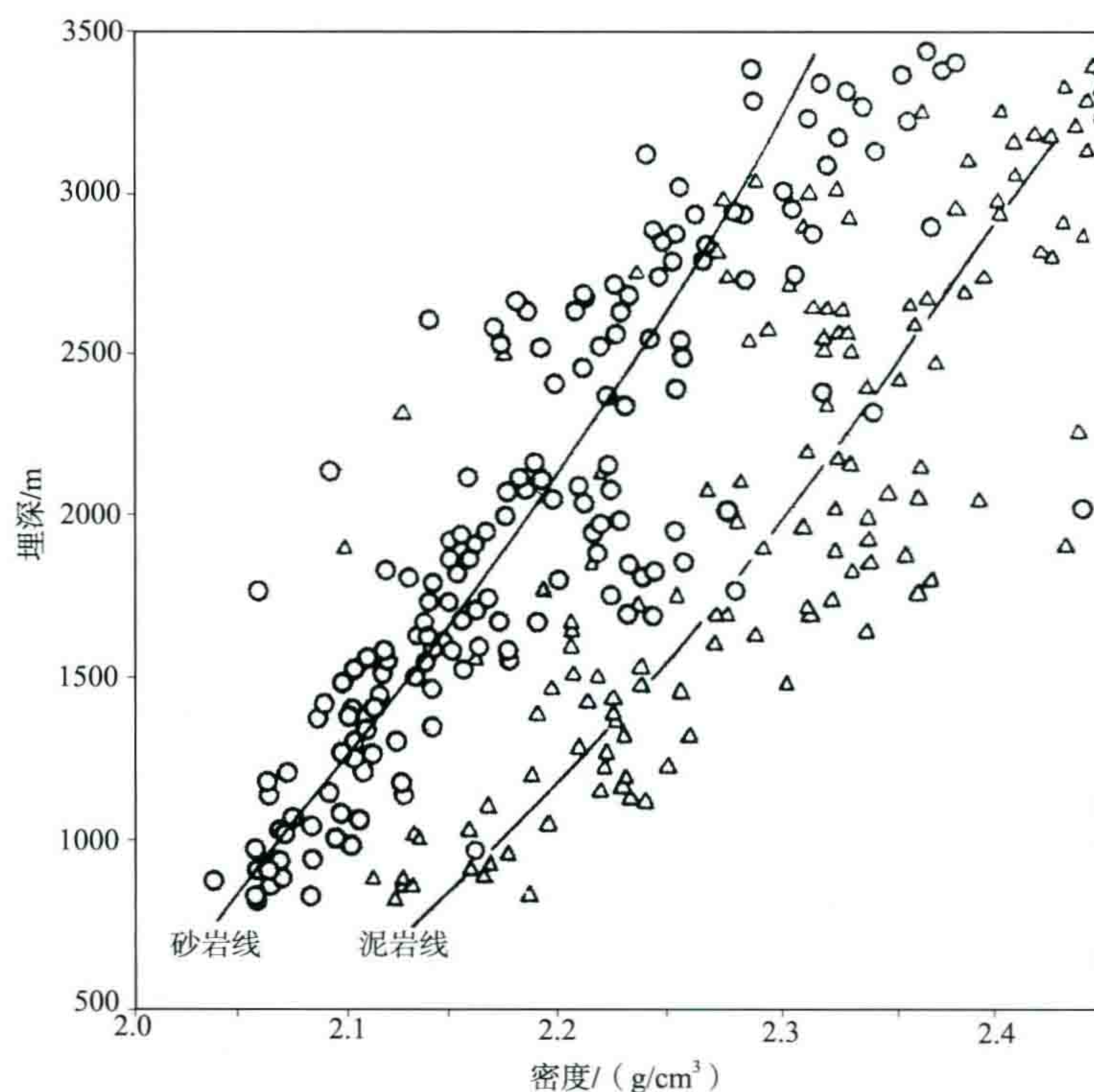


图5 冀东油田老爷庙地区的砂、泥岩密度分布图(据4口井综合)

△表示泥岩；○表示砂岩

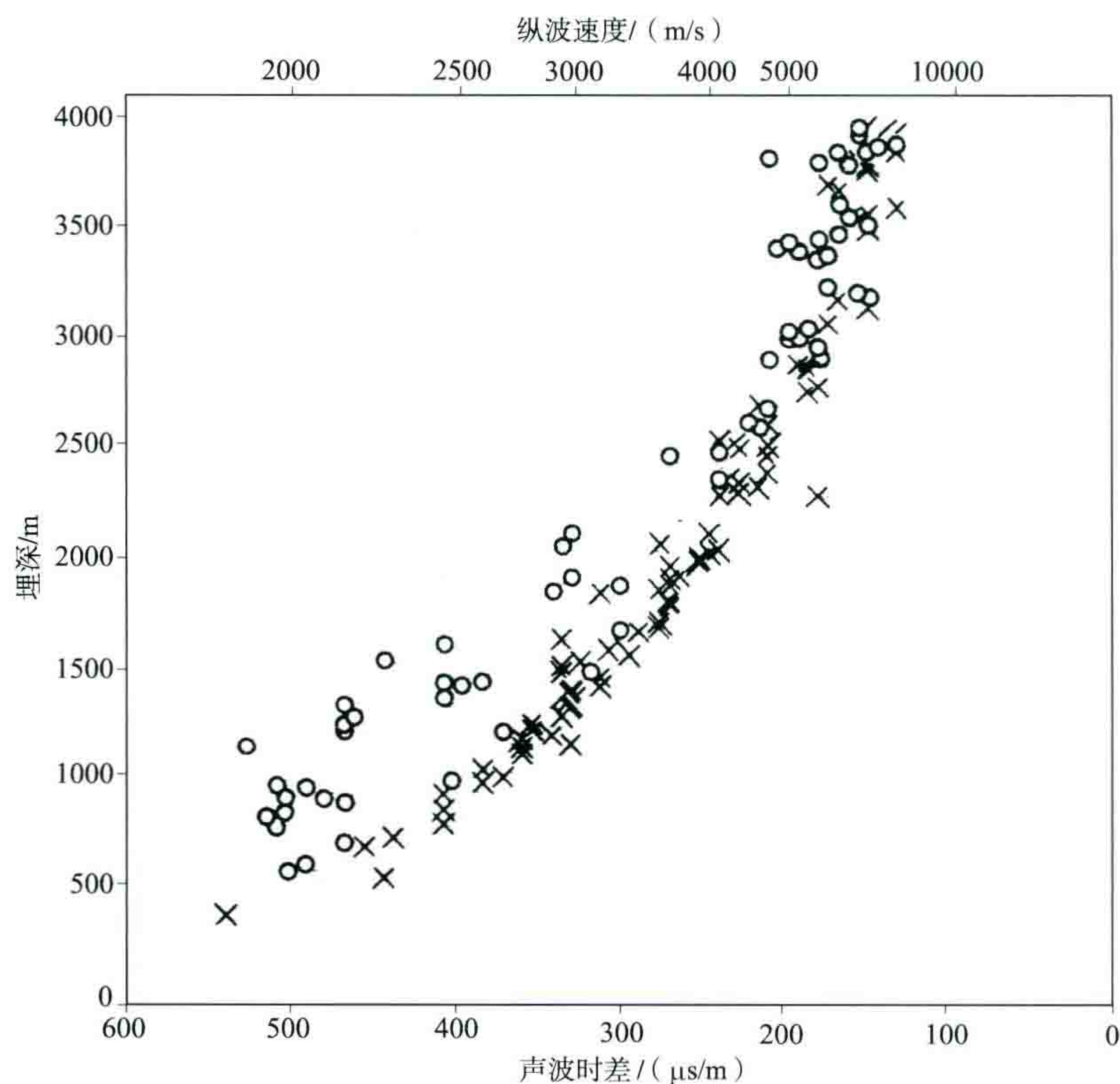


图6 老爷庙地区庙2井声波时差散点图

○表示泥岩；×表示砂岩

我国东部及西部地区的中新生界沉积中，砂岩与泥岩的密度差也经常超过0.1 g/cm³。图5是冀东油田老爷庙地区不同埋藏深度的砂岩、泥岩的体积密度散点统计图。图中同一深度上砂岩的密度比泥岩的

小(只有个别的泥岩密度比砂岩小)。该区第三系地层的砂岩密度和泥岩密度相比,平均小 0.1 g/cm^3。

图 6 是老爷庙地区庙 2 井不同埋藏深度的砂岩、泥岩的纵波速度的散点统计图。其中砂岩比泥岩的速度高 300～500 m/s,3000 m 以下又趋于一致。

据计算,只要地下数千米深的地层中有 1 层砂岩厚度横向变厚 3～5 m,它所产生的重力异常就会超过 10 m 厚油层引起的微重力异常。例如,1 层砂岩的厚度横向变厚 5 m(或变薄、尖灭),它与泥岩的密度差为 0.1 g/cm^3 时,依据式(2)计算的重力异常值为 20.9μGal。

图 7 是一个由岩性变化引起重力异常的理论模型计算结果。一层砂岩厚度从左边 15 m 向右边变为 5 m。假如密度差为 0.1 g/cm^3,于是在 10 km 范围内的重力场变化了 33μGal。由此可见,地下数千米深地层中只要有厚 50 m 砂岩相变为泥岩,就会引起 150～200μGal 的重力异常。

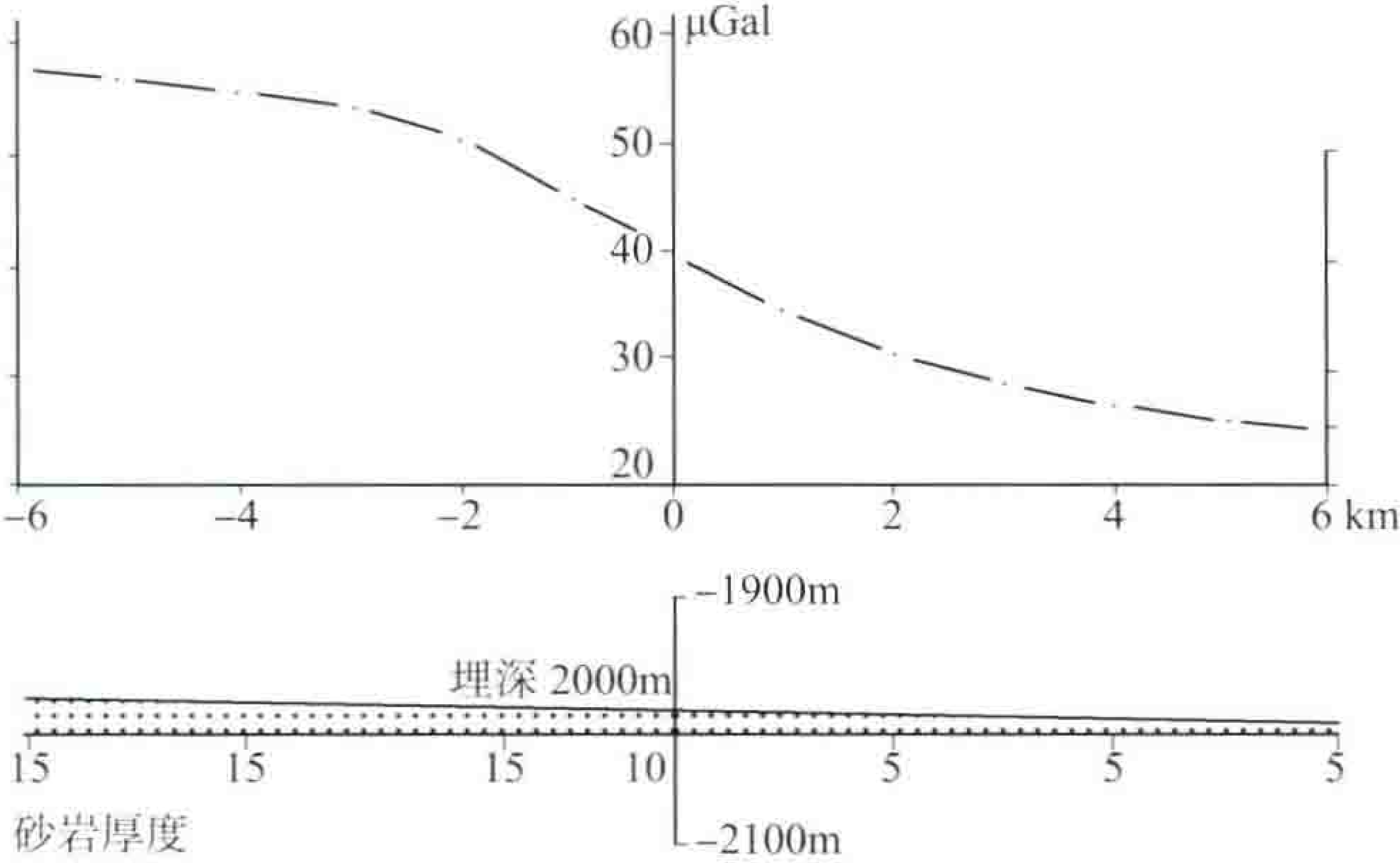


图 7 岩性变化引起重力异常的理论模型

表层岩性不均匀性的影响更加明显,例如土壤中的沙子分选最好,孔隙率较大;黏土层较结实,孔隙小;砾石层密度大;耕作土壤空隙最大。就是说,表层结构的密度差异会导致明显的重力异常。

图 8 是厚度为 20 m 的不同地表岩性所造成的 100μGal 重力负异常示意图。此例假定岩石骨架密度为 2.70 g/cm^3,并且都饱和水,只是孔隙率随岩性而变化。这个模型与我国西部地区一些小盆地中的地表岩性变化极为相似。若层厚达到 50 m,则会引起 250μGal 的重力负异常。

此外,地表附近的第四系疏松地层中的不同含水情况也会引起明显的重力异常。据理论计算,潜水面以上 50 m 地形高差所造成的重力负异常可高达 313μGal(图 9)。理论计算模型参数如表 3 所示。

表 3 表层不同含水情况下引起的理论重力异常值

厚 度/m	含水饱和度/%	密 度/(g/cm^3)	与中间层密度差/(g/cm^3)	每 5 m 厚的异常/μGal	高 50 m 处的异常/μGal
低速带 H_0=5 m	30	1.86	−0.24	−50	−313
降速带 H_1=0～45 m	60	1.96	−0.14	−29	
潜水面以下	100	2.10	0		

注:第四系孔隙率取为 35%,岩石骨架密度取为 2.70 g/cm^3。

每层体积密度采用如下公式:

$$\sigma=(1-\phi)\cdot D_m+(\phi\cdot S_w) \tag{4}$$

进行计算。式中:S_w 是孔隙中的含水饱和度;D_m 是岩石骨架密度;ϕ 为孔隙率;水的密度等于 1.0 g/cm^3;空气密度小于 0.001 g/cm^3,可忽略不计。

当中间层密度采用 2.10 g/cm^3 时,则表层校正过头,使布格异常出现负异常。而常规的布格校正中间层密度往往采用 2.30 g/cm^3,情况会更严重。因此当地面出现地形隆起时,由于布格校正不正确,就可能人为地算出一个−313μGal 的异常。

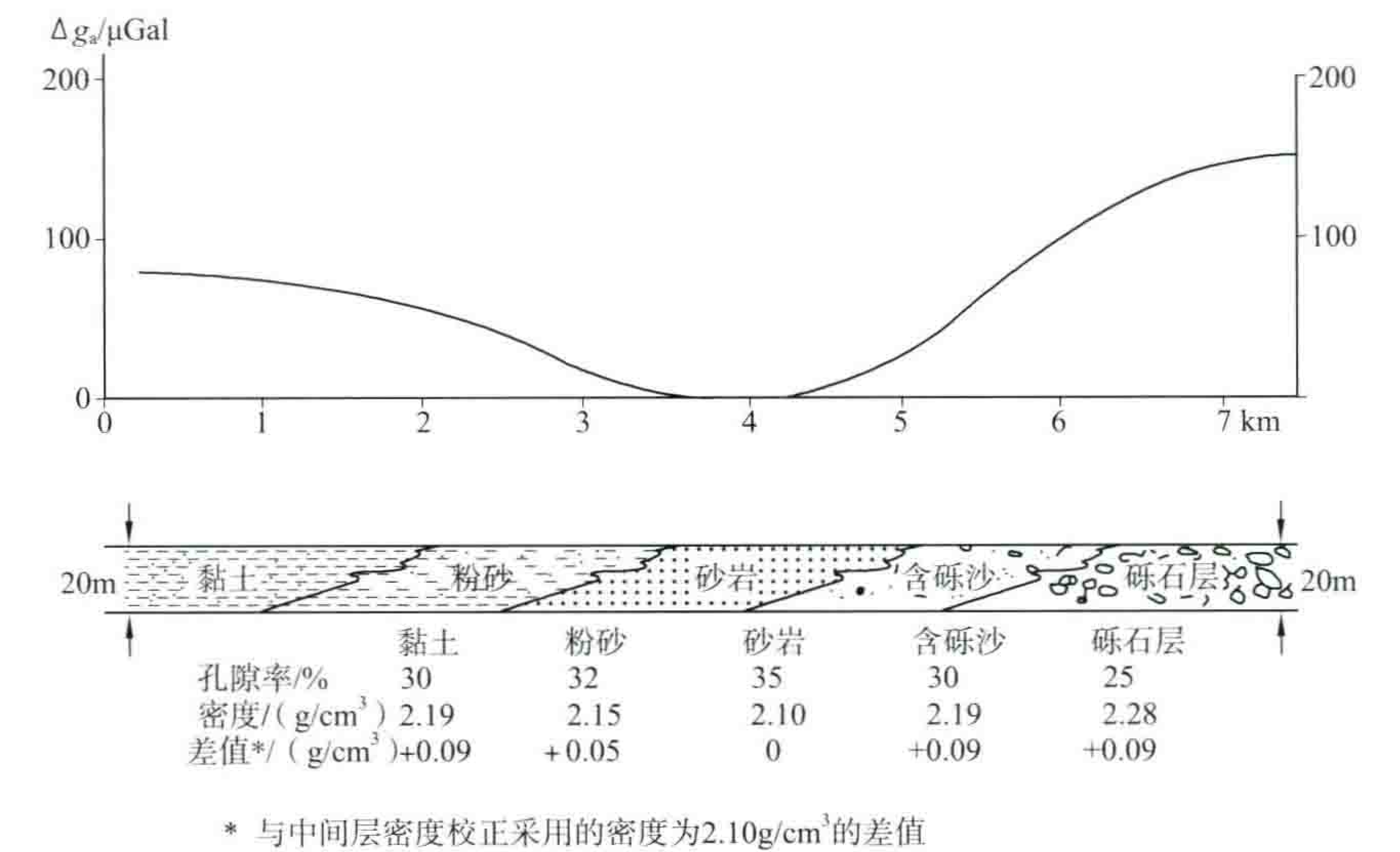


图 8　表层厚度 20 m 时的不同岩性引起的重力异常

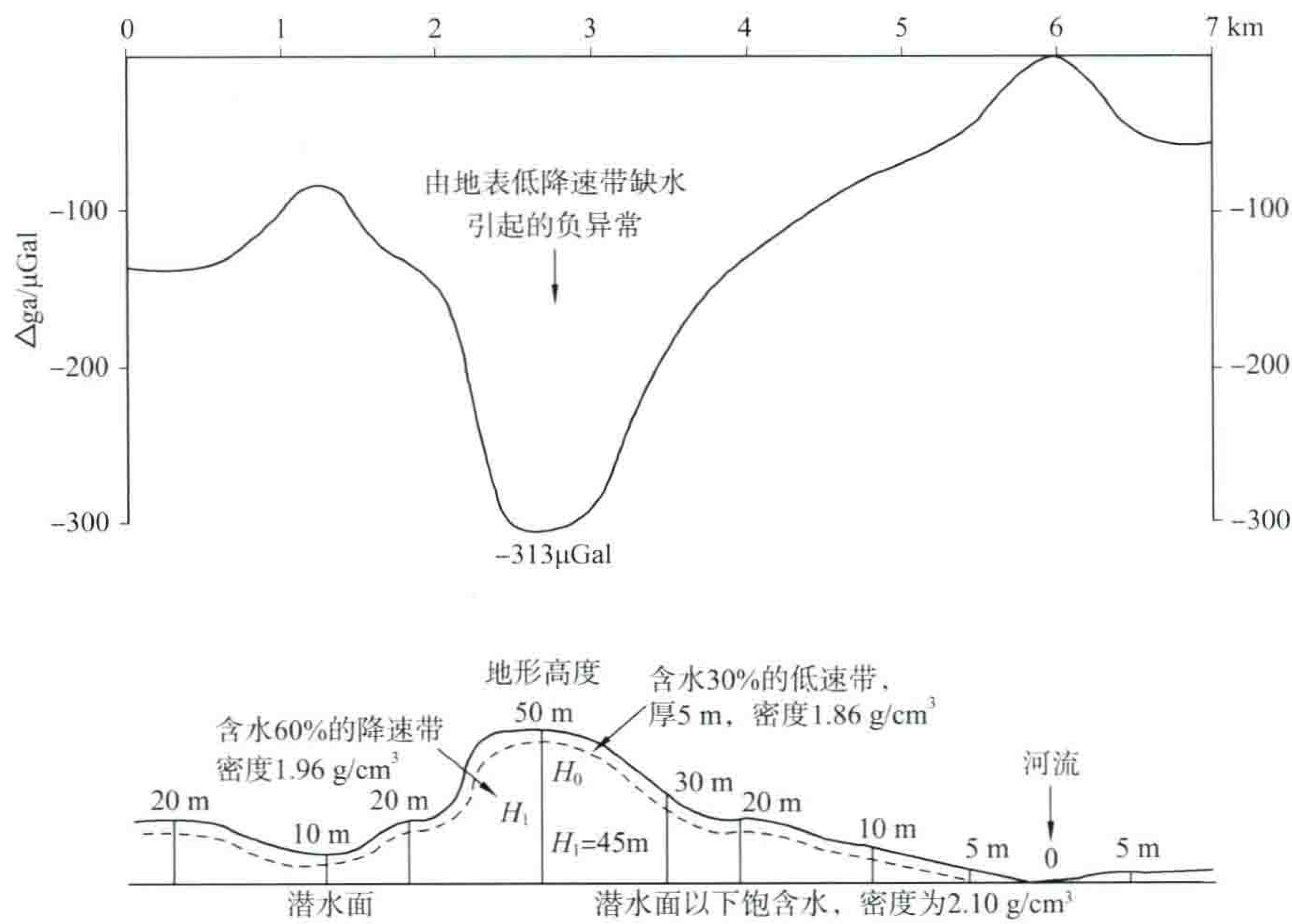


图 9　由地表低降速带缺水所引起的重力负异常

六、重力场的组成

为了对重力场的组成有一个全面的、概略的了解，笔者将各种地质因素引起的重力值变化大小及多种干扰因素的影响范围均列在图 10 中。此图的纵坐标是对数坐标，每一小格相差 10 倍。最顶上是总的绝对重力值约 980 Gal，它与底线上的重力值相差 10^{11} 数量级，底线 0.01μGal 是超导重力仪的读数精度。

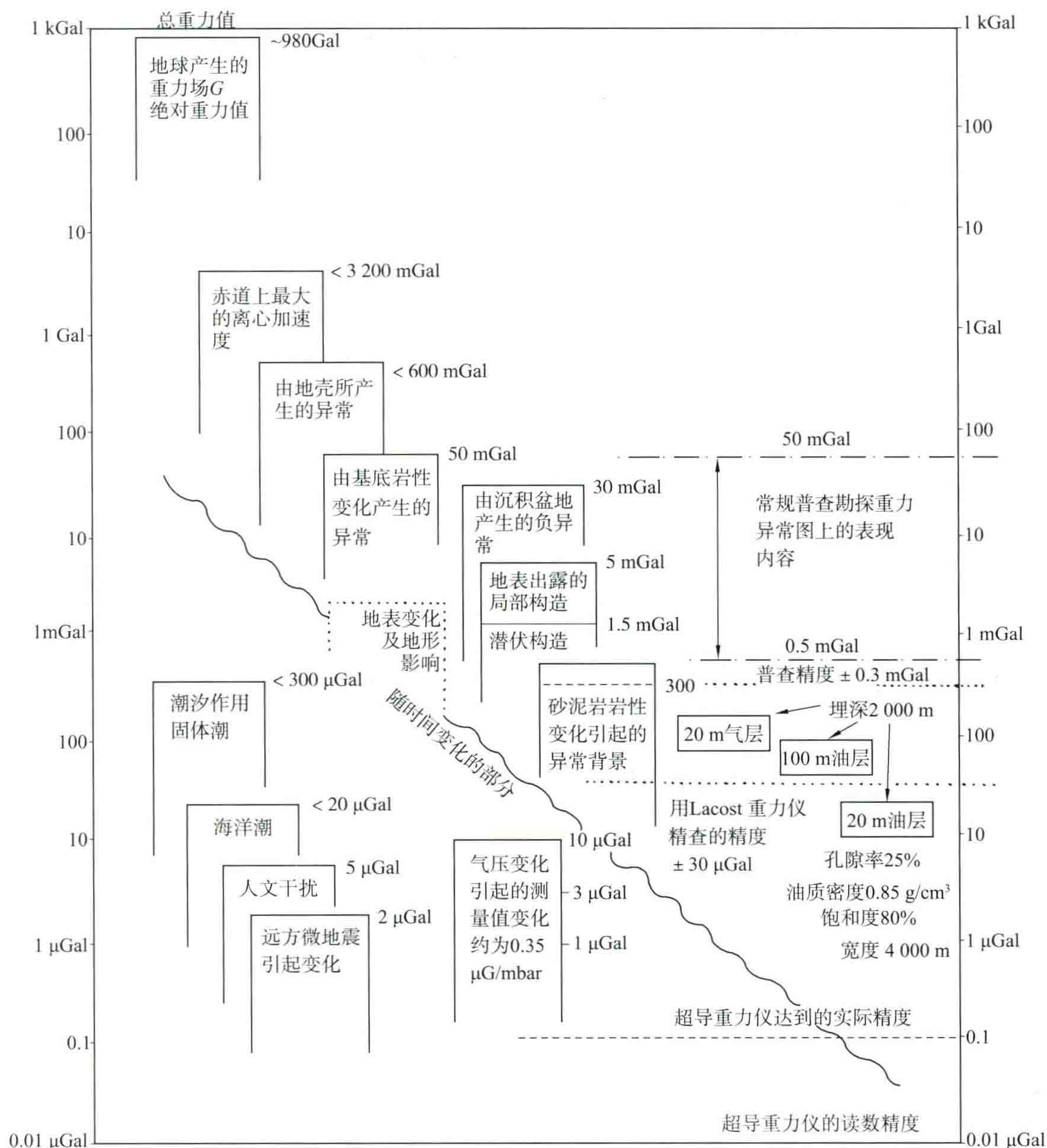


图 10 重力场的组成示意图

重力普查的精度大致为均方根误差±0.3 mGal左右。在常规重力布格异常图上所看到的基本内容是：地壳及基底岩性变化所产生的异常和沉积盆地的负异常，只有通过各种区域校正，才能看到局部构造产生的异常，而普查的目的恰好是寻找局部构造。在以往的实际工作中，人们的注意力通常都是集中在图中50～0.5 mGal范围内，所以没有人注意到砂泥岩岩性变化也能产生背景异常。

近年来开始作重力精查。若用拉科斯特重力仪作高精度重力精查，其精度可以达到20～30μGal左右（如图中横点线所示），此时，人们开始注意对潮汐作用加以校正。在这种情况下，虽然在埋深2000 m处的100 m厚油层或20 m厚气层可以达到精度要求，但是由砂泥岩岩性变化引起的背景异常值却可以大大超过油气的异常值。遗憾的是，这个因素往往为人们所忽略。

现在有人提出，“只要重力仪的精度不断提高，直接找油将是一个必然趋势”，“测网加密以后，对于干扰的认识和剔除也更为容易”。[14]实际情况并非如此简单，因为由地下（不是地表）岩性变化所产生的重力异常无法事先知道，它和油气产生的异常叠加在一起又是不可分辨的。可见这个问题不是提高观测精度所能解决的。此外，最近还有人模仿“航磁微异常直接找油”的思路，提出重力异常场在油气田上方也存在

锯齿状异常,不知他们有什么理论根据。我怀疑这种锯齿状重力异常,最可能是地表岩性不均匀、孔隙率和含水饱和度不一致所引起,并非直接找油的依据。

普通砂岩与泥岩的密度差常常达到±0.1 g/cm³,于是只要有几层砂岩相变为泥岩,就会造成重力直接找油的错误判断。由此可见,试图利用重力直接找油的想法是难以实现的。而利用重力直接找气还是有可能的,因为天然气的密度很小,在埋深 2 km 时,地下天然气的密度约为 0.2 g/cm³。但是也只有在埋深浅、地层时代新的情况下(例如青海、南海)寻找厚层天然气才有可能。在陕北找古生界奥陶系灰岩含气层时,该区的孔隙率仅为 5%~8%,密度差才有 0.04~0.06 g/cm³,在那里利用重力找气也不可能成功。

七、超导重力仪的出现

超导重力仪是 1968 年由美国加利福尼亚大学开始研制,1993 年由美国 GWR 公司推出轻便型。[6,7] 超导重力仪的灵敏度(读数精度)为 0.01 μGal,比拉柯斯特重力仪高一个数量级以上,实际重力测量的精度为±0.1μGal。该仪器的掉格基本上可忽略不计。该仪器的结构如图 11 所示。

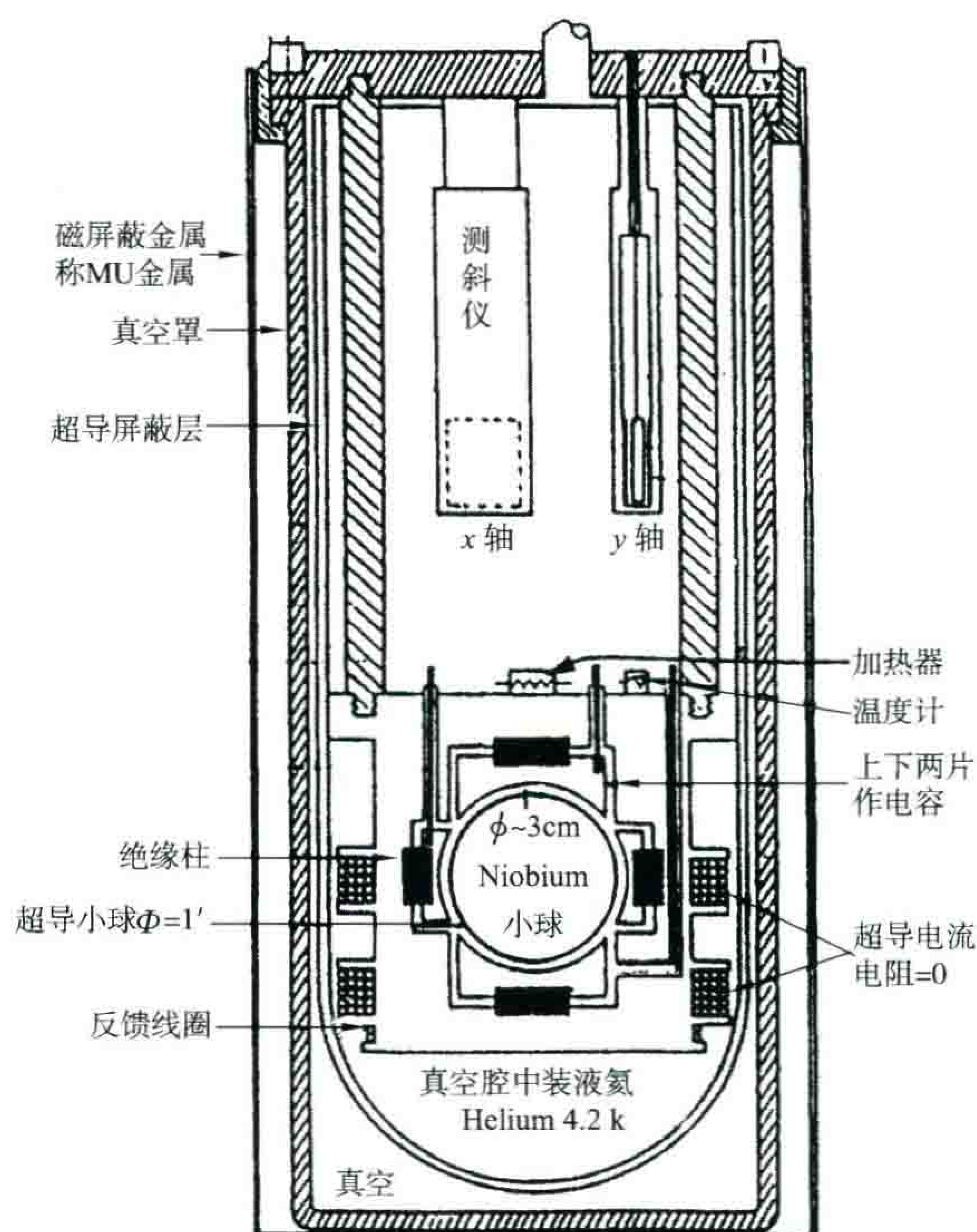


图 11 超导重力仪的结构

该仪器的工作原理是将一个直径为 1 in 的铌质金属小球置于超导的环境下,使它漂浮起来。当重力有微弱的改变时,小球的位置有相应的升降,立即会在上下两个电容极片之间产生电桥的不平衡,于是由仪器控制产生反馈电流,从反馈线圈中流过,再使小球恢复到原位。而反馈电流的强度,就是重力改变的一种度量。图中小球两侧有上、下两组线圈,是维持超导电流通过时产生磁场的线圈;圆形罐用来装液态氦气,其温度维持在 4.2 K;罐的外层中为真空,用以维持绝热状态;仪器外壳用一种磁屏蔽的金属制成,称 MU 金属。

整个仪器高 1 m,直径 1 m,重 50 kg。在工作过程中,每 60 d 需要灌一次液氦。轻便型"超导重力仪"高 0.5 m,其读数精度为 0.1 μGal,可以作高精度重力测量。野外测量时,同时使用两台仪器,其中一台作野外测量,另一台作日变校正之用(由于基本上没有掉格,所以只要直接减去固定站上的日变仪读数即可)。

图 12 是两台超导重力仪在同一个点上作 24 h 观测的曲线,它主要反映一天内的潮汐变化(包括固体潮与海洋潮)。经低通滤波后(细线)变化幅度约 200 μGal。两条粗线为两台仪器经高频带通滤波后的情

况，曲线形态基本一致，其上的小抖动反映了两台仪器的测量值波动（仅 0.1 μGal 左右）。可见，超导重力仪的实测精度很高。

图 13 是两台超导重力仪连续 24 d 的观测曲线。图上方第 1 条曲线是气压变化的数值，已经用 0.3 μGal/mbar系数换算成重力读数的变化；图中的第 2 条曲线为一台超导重力仪的读数值经过潮汐校正后的情形，它与气压曲线基本一致，幅度有 5～7 μGal 的起伏；图中第 3 条曲线是第 2 条曲线与第 1 条曲线相减的结果，即作过气压校正的情况。此时，还有 3～4 μGal 的起伏，这是由人文干扰（远方汽车震动等）及远方微地震所引起的重力仪读数变化，这部分重力读数是基本无法作校正的；图中最下方一条曲线是两台超导仪之间的读数差别，最多相差 0.2～0.3 μGal，其平均误差在±0.1 μGal 左右，这便是超导重力仪本身的实测精度。

目前超导重力仪主要用来研究长期的（几年、几十年的）潮汐变化规律，地球自转轴的极移章动，以及研究地壳板块的长期变动规律等。

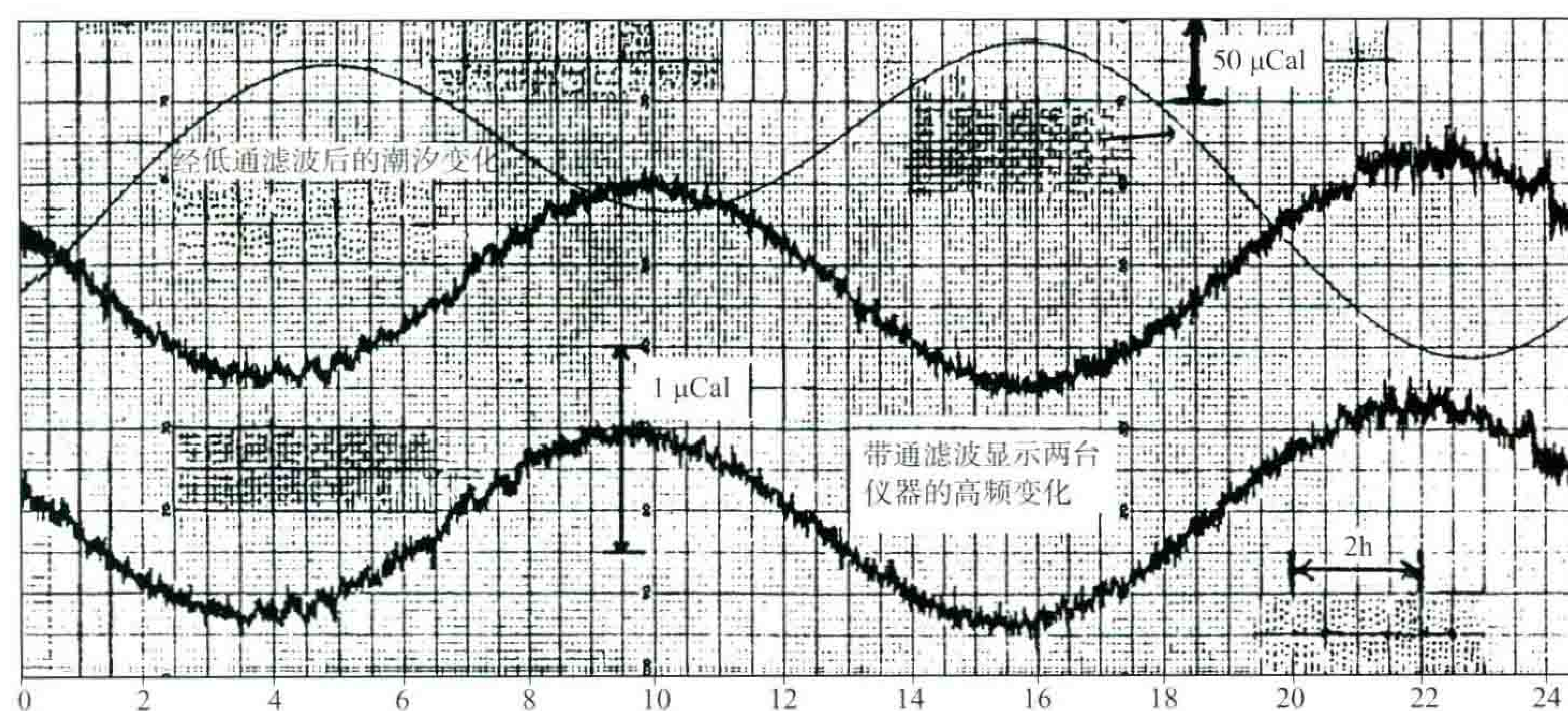


图 12　两台超导重力仪进行 24 h 的观测结果比较

细线表示经低通滤波后的潮汐变化曲线

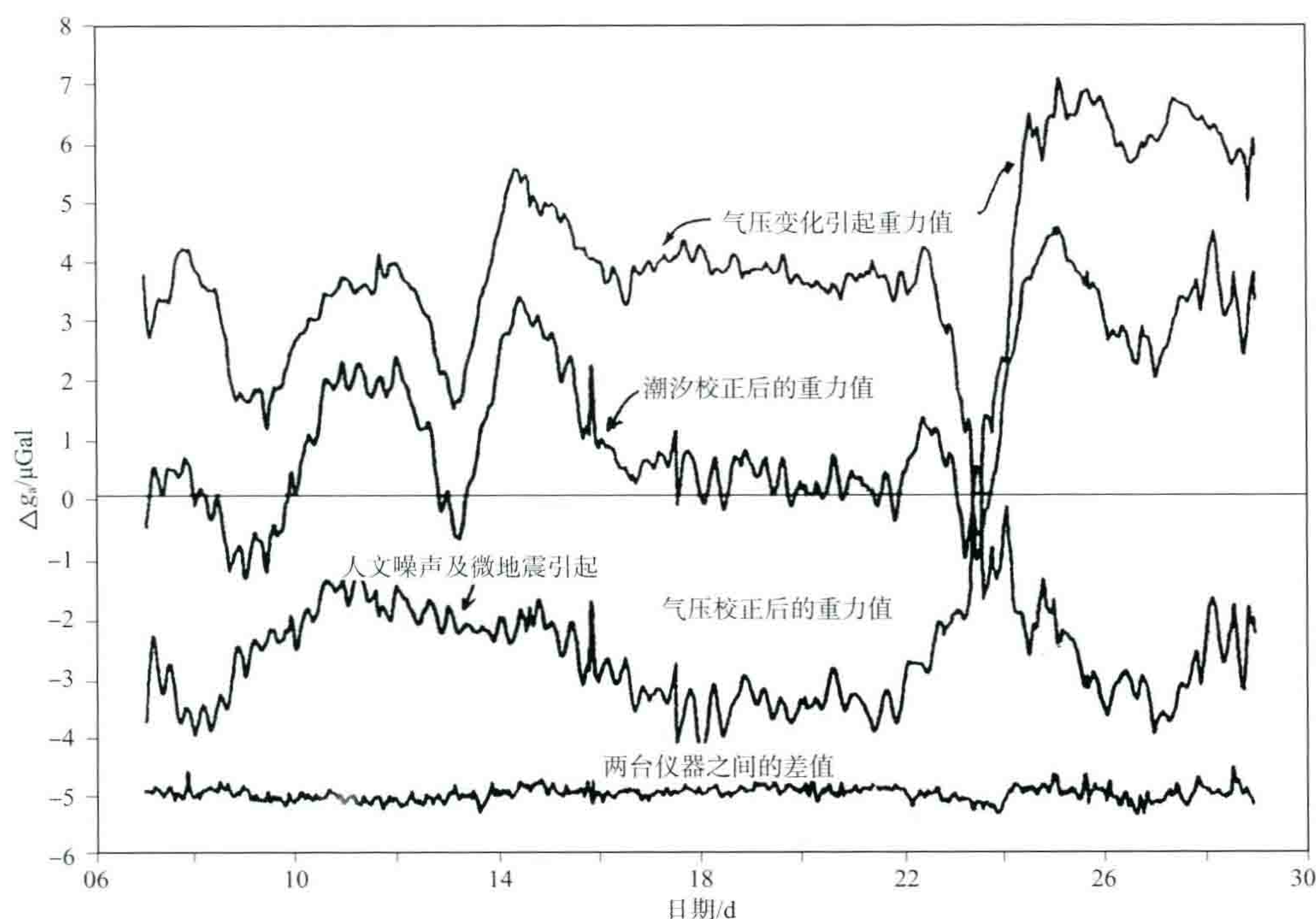


图 13　两台超导重力仪连续 24 d 的观测曲线

1993 年 7 月，在中美地球物理学术会议期间，我有幸与 GWR 公司的总裁 Richard J. Wold 先生交谈。我有意询问超导重力仪能不能直接找油，Wold 先生断然回答说“不能！”他解释说：“油气与水的密度差远

远小于砂岩与泥岩的密度差，所以除非你能搞清楚整个地下砂岩与泥岩的分布及其密度变化，才能判断地层中是否有油气。”但是，此仪器可用来试作油藏开发过程中的“油藏监测”。例如，油的大量产出，必然造成地下的质量亏空。此时砂岩、泥岩的位置是不变的，只要仪器精度达到 0.1 μGal，是可以测量出地下的“亏空”。Wold 先生真不愧是位诚实的学者。

八、艾菲技术直接找油的效果剖析

勘探效果是衡量每项勘探技术的试金石。实际上艾菲技术的勘探效果并不像艾菲公司宣传的那样，它的实际测量精度很差，重复性很差，勘探效果也很差。

（一）艾菲微重力仪的测量精度

该仪器的测量数据最后被整理成“艾菲”单位（AFI）。艾菲公司对什么叫一个艾菲单位没有作出任何解释，只说它是与油气有关的量，并且与含油丰度成正比，并可以根据它圈定含油气范围。它的测量计算值人为加上 30 AFI 以后，大多在 25～38 AFI 之间变动。在解释时规定：凡是艾菲值大于 32 者为有利含油气异常区，小于 29 者为不利（低产或无油区）。因此，含油与不含油的艾菲值仅差 3 AFI。但严重的是，实际交点上的两次测量闭合误差往往差到 3～5 AFI。例如，江苏油田刘庄地区共有 60 个交点，闭合误差大于 3 AFI 者有 27 个，占 45%，最大误差为±5.75 AFI。江苏油田周庄工区共 170 个交点，有 51 个点闭合误差超过 3 AFI，占 29%，误差超过 5 AFI 的占 16 个，最大误差达 8.47 AFI。云南保山工区交点有 163 个，误差大于 3 AFI 的有 46 个，占 28%，最大误差为 7.74 AFI。然而艾菲公司的成果异常图的等值线间隔为 1 AFI，而且艾菲成果解释时判断含油与不含油的差别也仅仅是 3 AFI。这就直接违反了一般重力异常场测定的科学规范。上述事实说明，艾菲重力仪是测量精度很差的仪器。

（二）艾菲微重力仪测量的重复性

该仪器在中原油田大汶口凹陷边院地区曾发现一个有利异常[图 14(a)]，后经该仪器详查，发现原来的有利异常不见了[图 14(b)]，却在其他部位出现了新的异常，前后两次观测结果完全两样。在其他工区也发现类似的现象，可见艾菲重力异常是经不起检查的。

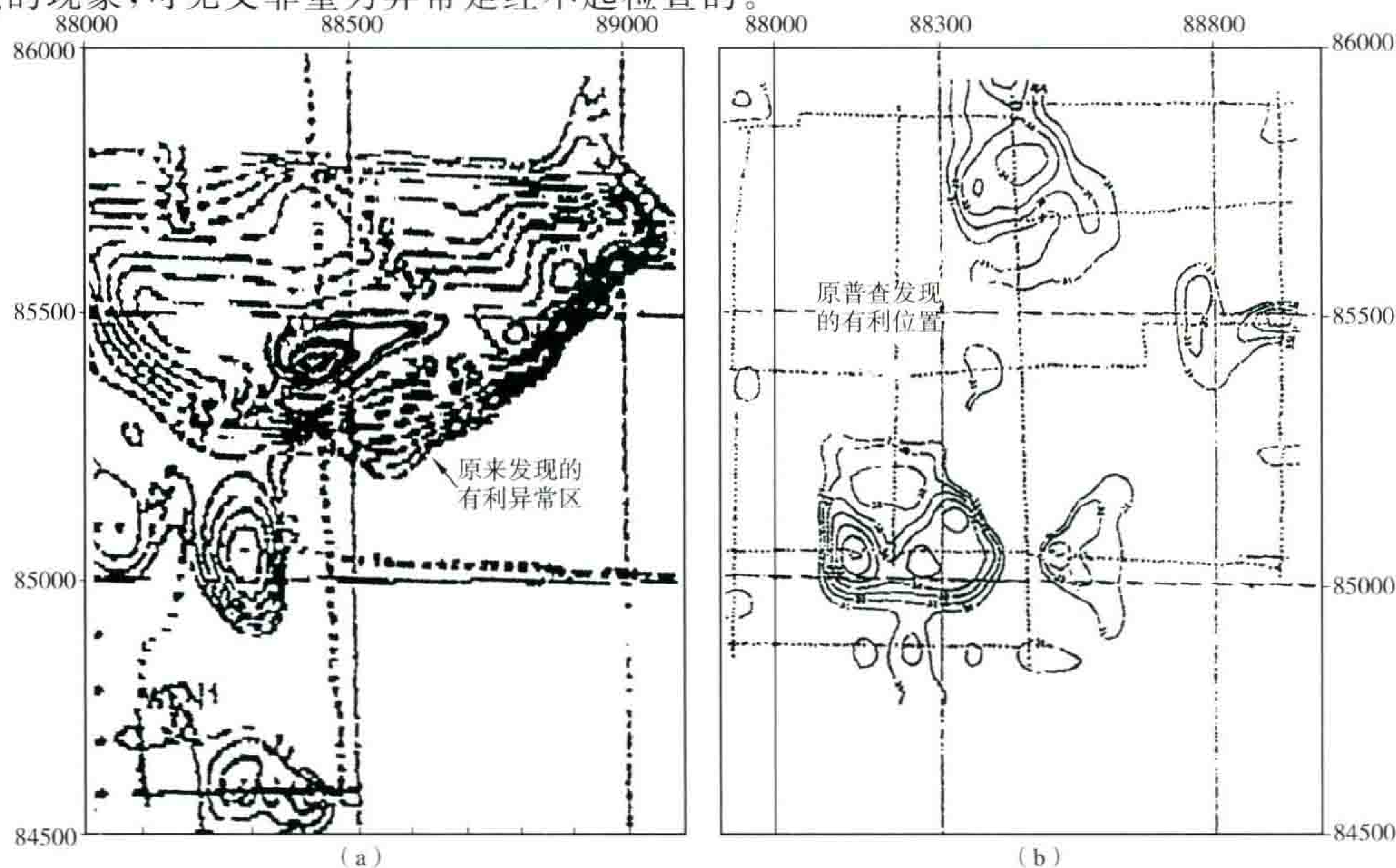


图 14 艾菲微重力仪在中原油田大汶口凹陷边院地区得到的成果图

（a）为普查结果（1993.9）；（b）为详查结果（1993.10）

（三）艾菲微重力仪到底测量什么物理场

曾经有人用这种艾菲重力仪在胜利油田海通大厦作了一次试验，把仪器放在电梯里，从 1 楼测到 11 层楼（高差 44 m），艾菲重力仪的读数竟然没有任何变化。据此，我推测它是一架重力垂直梯度仪，由上、下两个浮筒式液相阻尼灵敏装置所组成。由于仪器高度有限（仅 1 m 左右），并且浮筒的体积较大，一定会引起很大的气压及温度变化影响，所以它的测量精度可能比老式的“重力扭秤”还要差。

（四）艾菲微重力异常的解释和效果

在该仪器的解释工作中，异常值基线是人为制定的，不同工区可以采用不同的基线数值。一般定 30 AFI 为基线，于是艾菲测量的结果，永远是一半有利（高值异常），一半不利（低值异常）。从概率论出发，它所预报的成功率当然大致为 50%，这是一点不足为奇的。我们统计了最近两三年的艾菲微重力成果，经与钻探结果比较之后，全国各探区的“预报成功率”均在 50%～60%左右。

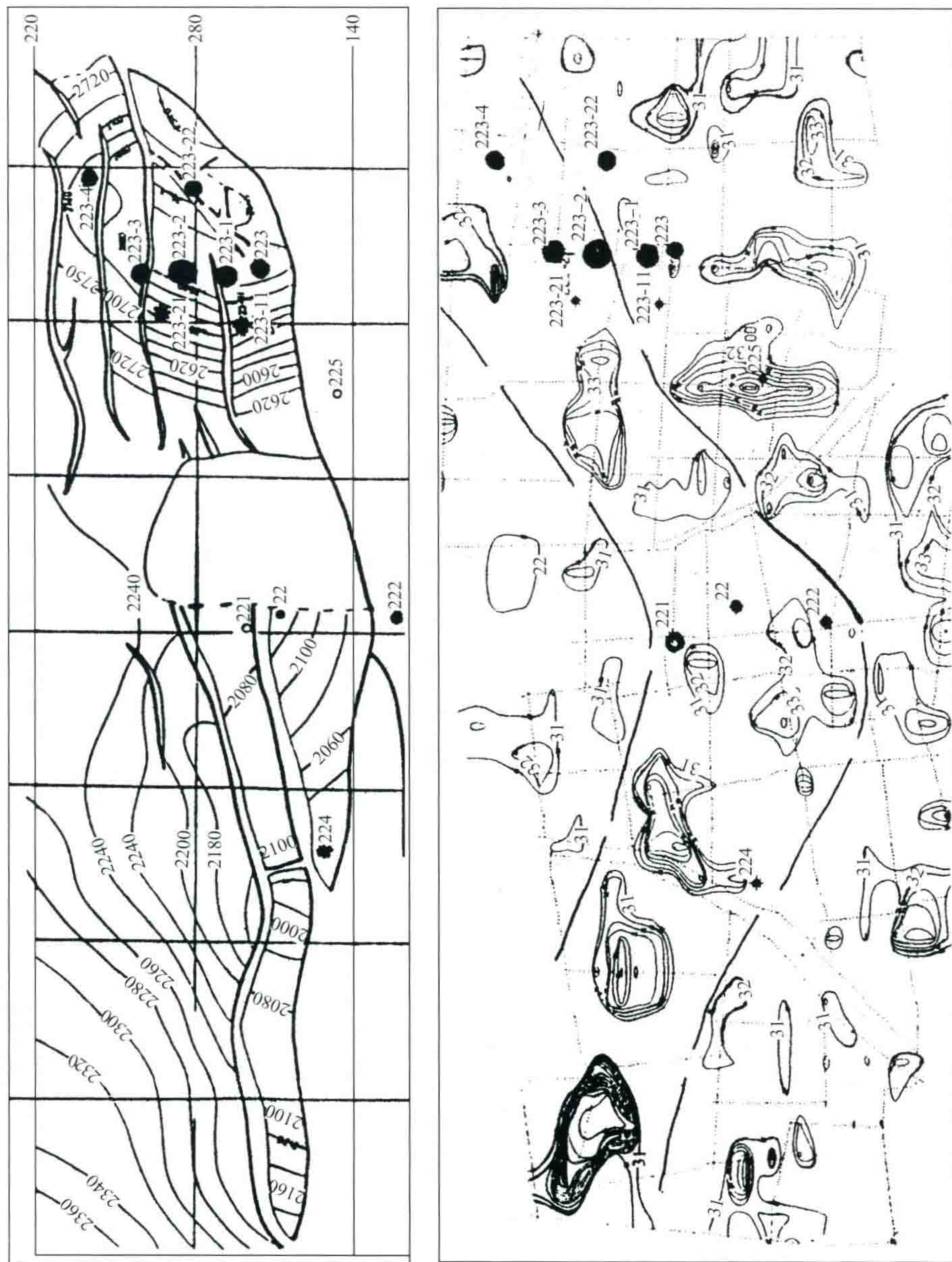


图 15 胜利油田临邑凹陷瓦屋地区的三维地震构造图（左）及艾菲成果图（右）

右图中的艾菲异常等值线是该区高艾菲值（大于 32 AFI 者）的所谓有利含油区

此外，由于它是一架重力垂直梯度仪，所以在大断层附近，凸起的上方会有更多的几率出现高值正异常（例如埕岛凸起）。其实这些高值正异常并不反映什么“质量亏损”，而是因为那里存在有正的垂直梯度异常，也就是说那里也正好是披覆构造的隆起所在。所以，在该处发现有油根本不是艾菲技术直接找油的贡献。

例如，胜利油田临邑地区 1992 年发现夏 223 井有油层 50 m 之后，立即进行了三维地震。图 15(上)为三维构造图，夏 223 井位于一个小背斜构造的顶部。不知是何理由，1993 年在这里又进行了艾菲直接找油。在这 12.6 km^2 范围内共布置 6684 个点，点距 25～10 m，可谓足够密了。在油田 1995 年总结报告中，据已完钻 12 口井列表统计称有 7 口井与艾菲成果基本符合，有 5 口井与艾菲成果基本不符合。这样，艾菲的预报成功率还有 58%，似乎不错。但是当我把探井的油层厚度用黑圆圈大致表示在艾菲中高值异常平面图上时(图 15 下)，无论谁看了都会对艾菲的成果产生怀疑：在夏 223 井区 50～80 m 厚油层区，竟然连一点艾菲高值异常也没有。

再如胜利油田的胜海地区位于埕北凸起东南部海陆过渡带，这里已经作过三维地震，又作过高精度重力精查。1993 年，再用艾菲技术直接找油。在 200 km^2 范围内布设了 26000 个点，动用了 400 t 级大船及 GPS 定位，花费资金 156 万元。把艾菲仪器放在船上测量，船是摇晃的，这样肯定测量精度更差。据说此区原始数据在 22～36 AFI 之间变化，其差最大为 14 AFI。成图后异常值只有 27～33 AFI，其差最大为 6 AFI。可见，艾菲公司已经在软件中作了很强的人为平滑，而且强词夺理说“这并不影响它对油气判断的正确性”。

该区的艾菲成果图见图 16。图中黑色部分为艾菲值大于 30 AFI 的地区，为有利区。深黑色为 31 AFI 区，称高值带，解释为最有利区。浅白色部分为小于 29 AFI，称低值区，为含油不利地区。白色条形异常带(低值带)被解释为可能的控油断层，已用深黑色轴线表示出来。其中从 2 井到 4 井一线稍南本来是埕北大断裂的延伸位置，此处布格重力场是一个异常线相对密集带，当然用艾菲垂直梯度仪器去测量时，在凸起上方会有正异常成带展布。但由于艾菲仪器测量精度很差，成带性时断时续。

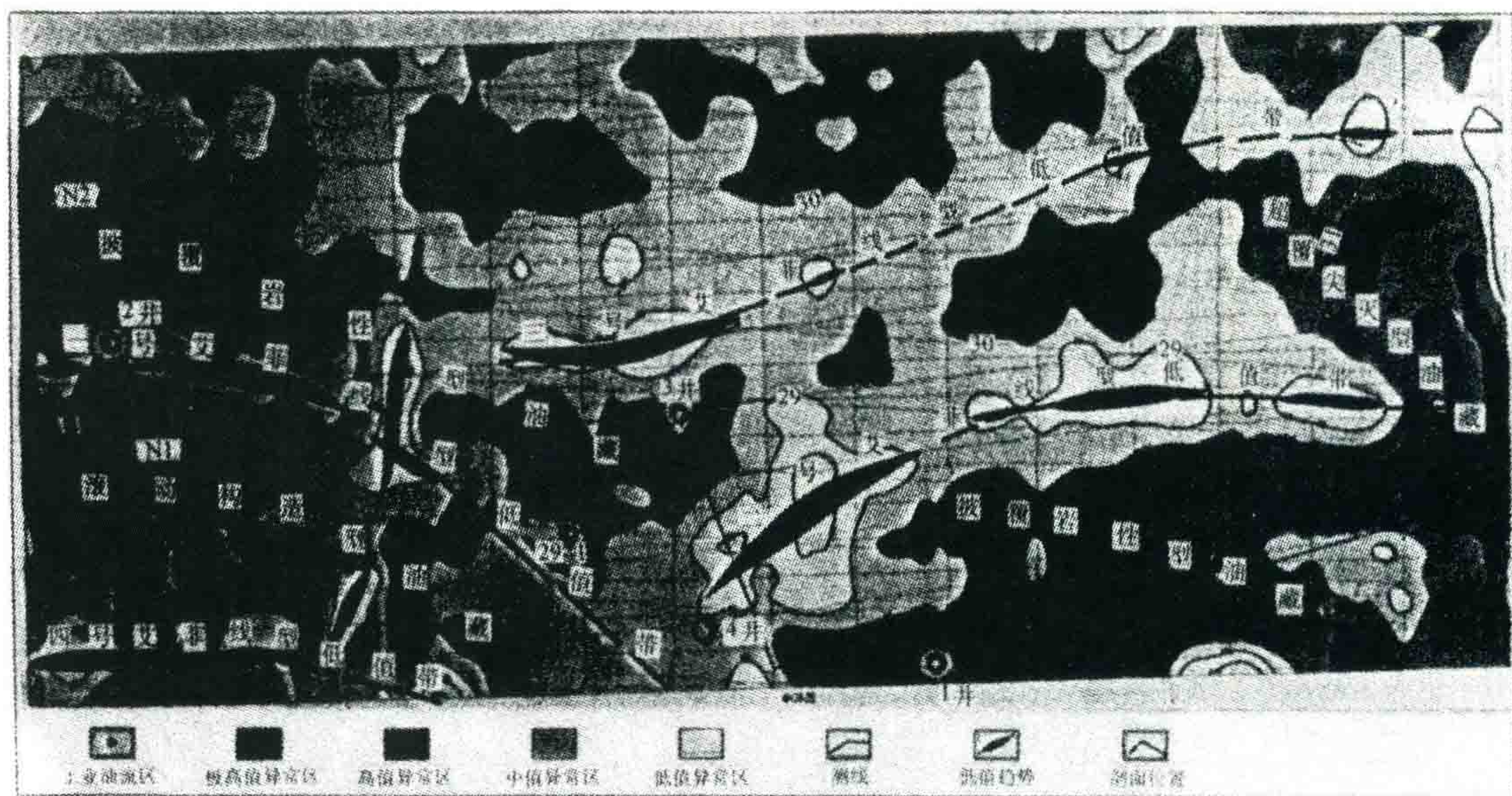


图 16　胜海地区艾菲微重力异常分布图

图 16 中已完钻井 5 口，以空心圆圈画出。这些井都打在埕北凸起上盘，所以全部见油层。该区除 1 井及 2 井在黑色区里面而外，其他 3 口井基本上都落在艾菲低值区，应该说不符合。尤其是 4 井的艾菲值仅为 29.2 AFI，很低；但实际上 4 井的油层厚 29 m，产量最高。这个事实是艾菲公司难以自圆其说的。然而，胜海公司的一位地质师却说：“这里艾菲效果很好，都很符合。”我不知道他的根据是什么？

九、关于评论艾菲技术的结语

(1) 艾菲技术的理论依据经不起推敲,测量精度很低,重复性经不起检验,其地质效果也很差。实际上,艾菲微重力仪是一种精度很低的重力梯度仪,根本谈不上是什么直接找油新技术。

(2) 地下砂泥岩岩性变化所引起的背景异常已大大超过地层含油气所产生的重力异常。因此,一般情况下用重力找油是难以实现的。直接找气也只有在气层埋深浅、气层厚、时代新的情况下才有可能实现。

(3) 应当正确理解预报成功率。预报成功率(或符合率)与探井成功率是分属两个不同的概念。前者属于概率论范畴。例如,用正异常和负异常各占一半的数据来预报有油或无油的成功率,即使是完全没有根据的乱猜,其预报成功率也将接近50%。若再加上某些先验知识作预报,其成功率统计将高于50%。有些地质家一听说预报成功率达到70%,就以为只要打10口井便会有7口井见油,这完全是一种误解。实际上探井成功率只统计见油的井,而预报成功率在不见油的情况下,只要曾预报过无油,也算预报成功。

(4) 鉴于我国目前的勘探市场还很不规范,出现了"岩性探测"和"艾菲技术"长期占有市场的现象。这类技术的共同特点是:① 以技术保密或专利为借口,既不公布仪器的原理,也不说明仪器测的什么物理场,还诓说能直接找油;② 自己编造了一套故弄玄虚的新理论,一会儿这样说,一会儿那样说,使人不知所云;③ 观测数据既无稳定性,又无重复性,数据解释带有很大的随意性。

(5) 我以为鉴别这类技术最好的办法是按正常程序对这类仪器的精度进行论证,对其观测数据的稳定性、重复性进行检查,并组织专业人员对其原理及技术手段作认真的调查。绝不能听其自然,任其泛滥。

十、兼论GONG直接找油技术

近年来,俄罗斯有一批学者也热衷于重力直接找油。其中最有影响的人物是俄罗斯国家石油地球物理研究生产联合体的N. H. 米哈依诺夫博士。他根据自己十余年来的研究,认为油气田上方几乎无例外地存在着一个0.1～0.3 mGal的重力负异常。若采用高精度的重力精查,加上仔细的解释分析,并结合地震资料作综合判断,就可以使探井成功率达到80%～90%。该方法被称为GONG法(是俄文ГОНГ,即高精度重力测量预测油气藏的缩写)。他声称曾先后在西伯利亚地区100个油田上得到验证,并发现了十几个新油田。据后来统计,400口井的钻探成功率达到85%。

为了试验该方法的实际效果,中国石油天然气总公司兰州西北地质研究所于1994年邀请以米哈依诺夫本人为首的6位俄罗斯专家来华与中方合作,组成了试验小组,并与玉门石油管理局签订了合同,在酒泉盆地3个小区内进行GONG直接找油试验。

1994年野外施工,采用了石油地球物理勘探局第五地调处的拉柯斯特-D型重力仪(同时使用了俄罗斯的ГНУ-КВ石英丝重力仪作对比,发现后者精度较差),采用GPS无线电定位及高精度水准测量,终于获得了较高精度的成果:其重力基点精度为±0.015 mGal,普通点为±0.020 mGal,高程误差为±0.04 m,坐标误差为±0.8 m,重力的总精度达到±0.025 mGal。

在资料整理过程中采用了异常点剔除的办法,其步骤如下。

首先,对每条测线的布格异常曲线进行检查,看有没有跳跃值,有的话及时作野外复测。

其次,采用一种正交测线检验方法:先把正方形测点的数据按南北向内插绘成等值线图,再抽其东西向测点内插绘成等值线图,然后将两张图相减,就能清楚地显示出跳跃误差的位置来,最后对跳跃节点上的数据进行修改。

最后,是对相邻剖面与剖面之间的异常带进行连续性检测。在解释过程中要十分注意这种检查。

即使通过上述这些工作,在仔细观看曲线的细节时,仍然会发现要定准100 μGal左右的负异常,依然

是十分困难的(图 17)。

酒泉盆地不像俄罗斯地台,后者重力场相当平缓,而酒泉盆地的区域重力场变化剧烈,在布格重力图上显出一个向祁连山方向逐渐下降的强大单斜型区域场背景。为了寻找微弱的、与油气有关的负异常,米哈依诺夫采用了线性区域场校正方法。经线性区域场校正后,重力异常剖面的曲线比较平缓了,但还是存在着次一级的区域异常。

图 17 是采用较大梯度的线性区域背景校正后的结果。图中带有朝下的小黑点的折线是实测重力异常场,点划线是米哈依诺夫解释的二次区域场背景,密点线是他解释的"恢复重力异常线"——也就是如果不存在油气时的重力值位置,或者说从密点线往下到折线的那一部分就是油气引起的负异常。图中部大三角形就是米哈依诺夫建议的探井井位 No. 2,他认为该处的负异常有 100μGal 左右。

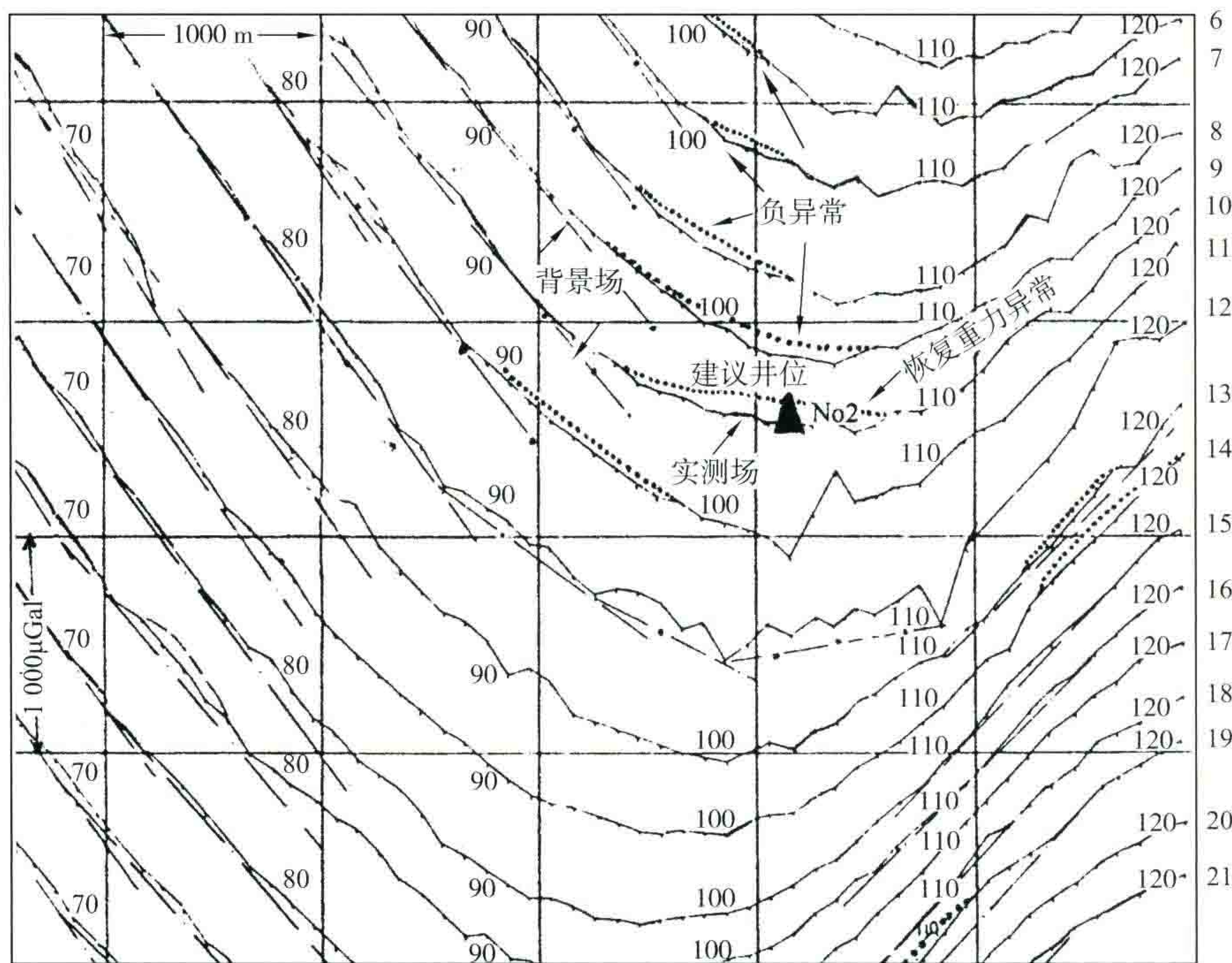


图 17 酒泉盆地马家梁-黑北地区南北向剖面经大梯度线性区域场校正后的结果

此图给我的第一印象是负异常的可靠性差,解释的主观性太强。例如,No. 2 井附近第 10 测线上描述恢复重力异常的密点线绘得很勉强。我们完全可以认为该测线上的实测曲线本来就很光滑下凹,并不存在什么负异常,其他测线也如此。

另外,从第 11、12 及 8 测线的曲线形态来看,虽然该区高精度重力的均方根误差已经达到±25μGal,但具体到每条曲线上,其起伏跳动还是不可避免的,要想从中客观地找出与油气有关的微重力异常,还是十分困难的。

笔者以为除那些突跳异常点外,只要地表或地下有二十几米的砂泥岩岩性变化,就可能造成重力异常曲线的上下摆动达到 100μGal。所以,米哈依诺夫的方法依然存在较多的问题。

再分析一下他建议的 No. 1 井。图 18 是同一资料采用较小梯度的线性区域背景校正后的平面剖面图。此图右方的 No. 2 井已经由于区域场太陡而不好解释。可见此图是为了适合 No. 1 井解释而作的。其实这张图上的 No. 1 建议井附近只绘出了 50μGal 左右的负异常,其可靠性更差。不少"恢复重力异常"的密点线往上拱,显得十分不合理。

那么为什么米哈依诺夫要把 No. 1 井优先提供钻探呢?原因是他参考了地震勘探的成果。图 19 是 GONG 的综合评价图。显然 No. 1 井是定在地震构造图的一个背斜高点上,而北面 No. 2 井只是单斜上的一个扭曲。据此,我似乎觉得,GONG 方法之所以成功率那样高,从根本上说,仍然是地震勘探的功劳。

这也正是GONG法非常重视综合解释的道理。在俄罗斯6人专家组中有地震专家、重力专家，还有地质家，也可以说明这点。因此，在我们评判GONG重力直接找油的成功率时，不要忘了它包括了地震勘探的成功率。

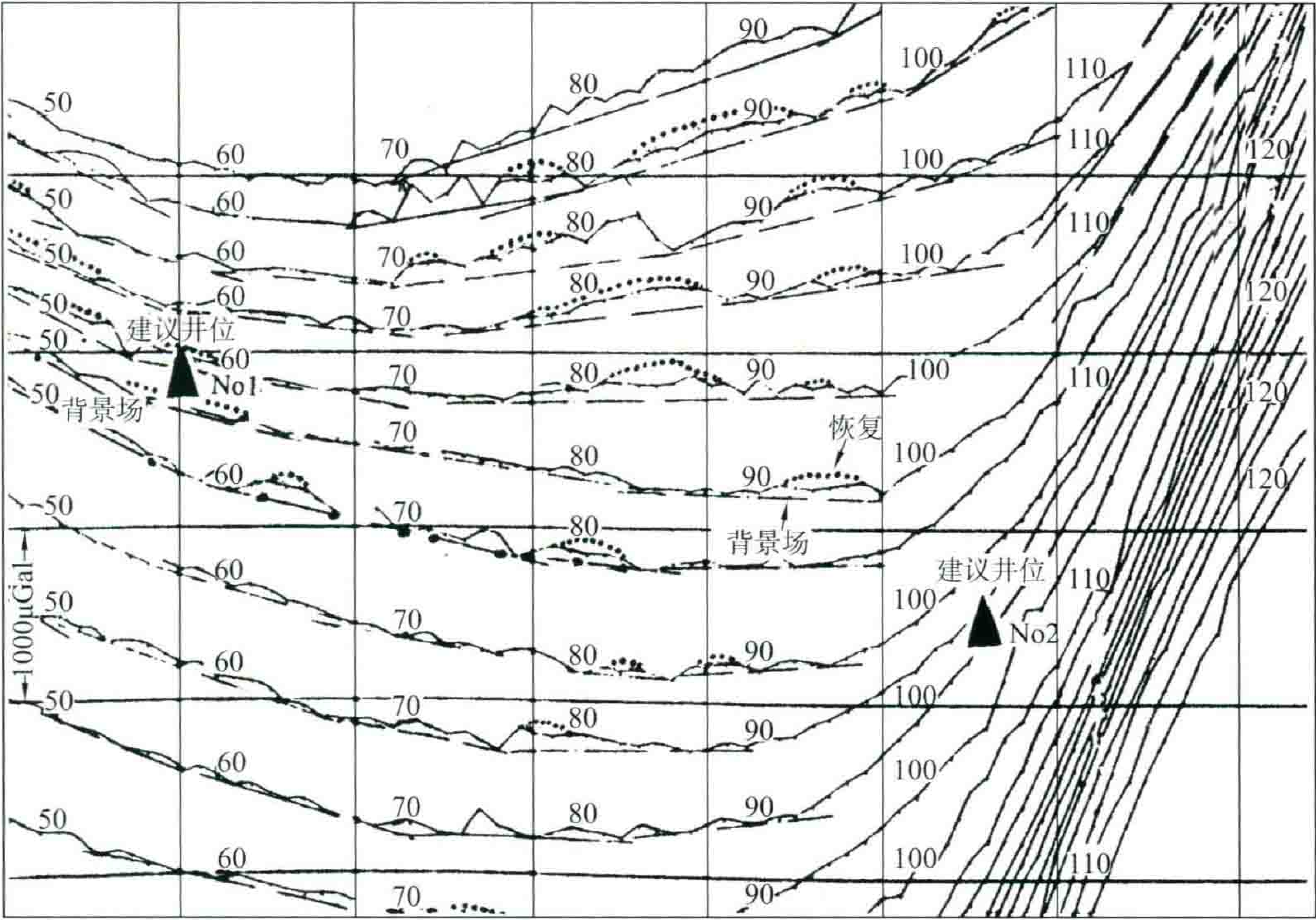


图18 酒泉盆地马家梁—黑北地区南北向剖面经小梯度线性区域场校正后的结果

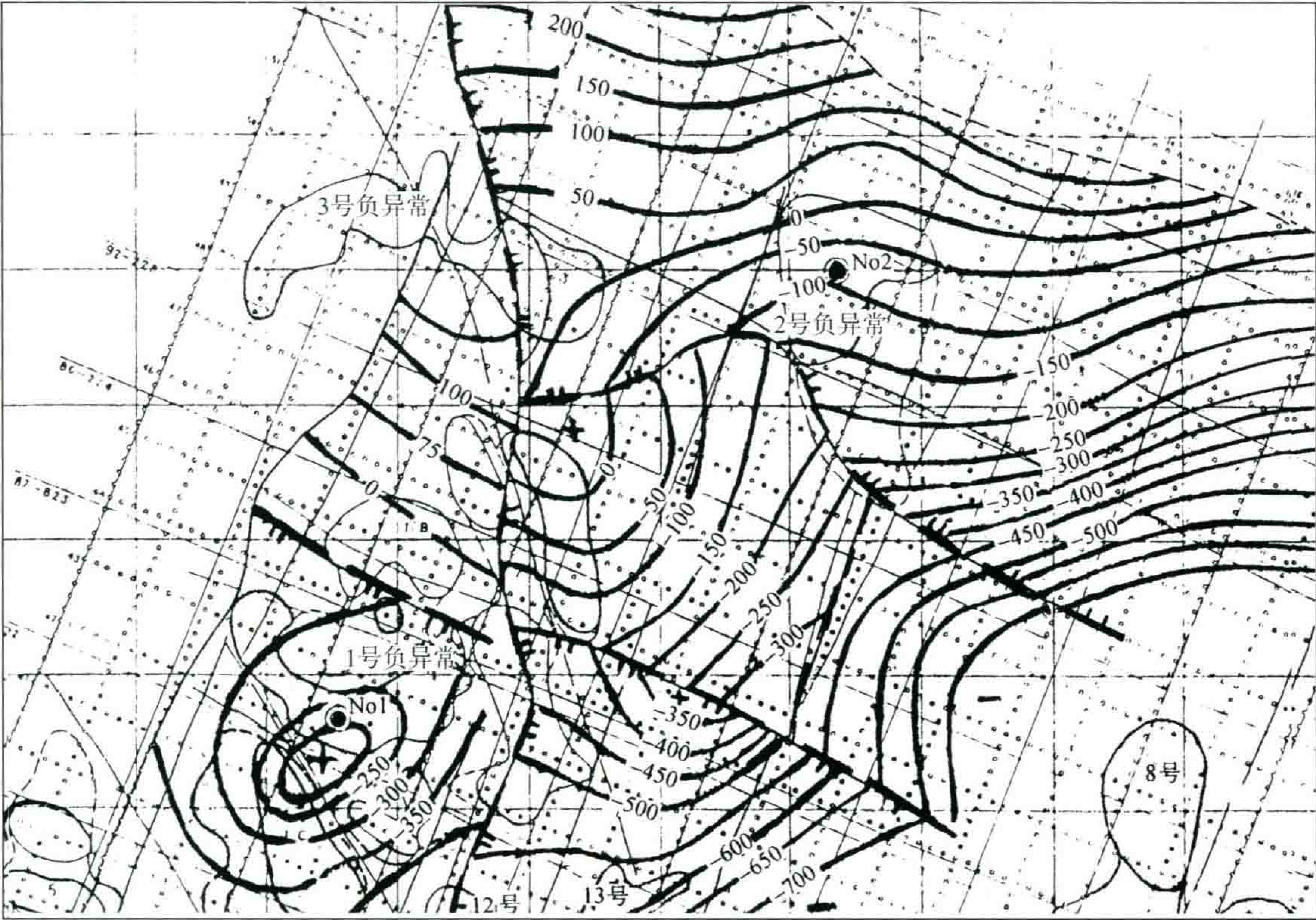


图19 酒东盆地GONG综合解释方法圈定的最佳油气远景图

细线为GONG的负异常线；粗线为地震构造线

十一、GONG 方法的理论依据和质疑

米哈依诺夫自己也承认:“用一般万有引力公式来解释油气田引起的重力异常是十分困难的”,但是他提出一套“油气藏重力信息”的假说(注意,这里只是一种假说而已,是并没有被证实的)。他先引用早在1825年拉普拉斯提出的引力吸收屏蔽假设公式:

$$F=[K\cdot(m_1\cdot m_2)/r_2]\cdot e^{-aL} \quad (5)$$

式中:K 是万有引力常数;L 是屏蔽吸收层的厚度;α 为吸收系数。米哈依诺夫认为重力场是一个辐射场,依据1920～1930年罗蒙索夫一列萨日的假说:“任何物体振荡都能发出重力辐射,并且其辐射功率与物体的质量成正比。此外除了行星与地球的综合辐射之外,地球中的岩石也会吸收这些辐射。”于是米哈依诺夫解释说:“在岩石中由于异常体的物质不同,它们对重力辐射的吸收屏蔽作用程度也不同,每一个有吸收的异常体就在地表观测面上表现出自己的反映(影子)。这就为使用重力勘探方法获取异常体的信息提供了可能。”与放射性辐射相似,重力场也随时间及距离而衰减。例如地球放出的原始重力辐射强度为 Φ_0,则地表上经过吸收的重力强度可表示为:

$$\Phi=\Phi_0\cdot e^{-\alpha\sigma L}\cdot e^{-kt} \quad (6)$$

式中:L 为吸收层厚度;σ 为岩石密度;α 为其吸收系数;而 kt 是随时间 t 而衰减的项。

米哈依诺夫又进一步解释说:“在天体物理技术上,点质量和短时间内,$\sigma\rightarrow 0$,$t\rightarrow 0$,所以 $\Phi\rightarrow\Phi_0$。也就是说,天体的相互作用仅取决于原始辐射,在这种情况下牛顿定律成立。”而在重力勘探中,$\Phi_0=\text{const}$,在吸收层(σL)上方,辐射吸收量为

$$\Delta\Phi=\text{const}\cdot\alpha\cdot\Delta\sigma\cdot\Delta L \quad (7)$$

式中:$\Delta\sigma$ 是密度差;ΔL 是吸收层厚;α 为吸收系数。式(7)就是 GONG 技术的理论基础,并可表达为:“GONG 异常仅与含油层与围岩密度差及含油层厚度成正比,而与含油层深度和水平距离无关。”它的物理含义是:“重力场是来自地心的辐射线,射线穿过油气藏储层时,部分被吸收,于是像影子那样在地面上出现相应的重力负异常。”

重力场的吸收衰减假说至今尚未被证实。米哈依诺夫的假说至少有以下两点值得讨论。

第一,把重力场理解为从地心出发的一种射线,穿过吸收异常体并在观测面上形成“影子”的说法令人怀疑。因为重力肯定不是从地心出发的,而是地球中每个部分共同作用的效果。如果有吸收,则必然与吸收介质的深度及水平距离有关,不会是简单的一个影子。

第二,既然地球中的岩石会对重力辐射产生吸收,那么,为什么只有油气产生负异常?地下水和其他密度大的矿物为什么不产生负异常?我认为这是 GONG 理论中最值得怀疑之处。米哈依诺夫无法证明碳氢化合物对引力辐射产生的吸收要比其他介质的吸收更强烈。

综上所述,GONG 直接找油方法的理论似乎已经走入歧途。而且 GONG 的实际负异常划分的主观性很强,恢复重力场的划定具有多解性。在预测油气的过程中,GONG 又主要参考了地震勘探的成果。所以,我怀疑传说中 GONG 的成功率那样高,大概是地震勘探的功劳。我劝大家不要迷信它。

结语

在本文结束的时候,我想再次申明我的文章只是一家之言,绝无强迫别人接受的意思,因此欢迎大家对本文展开讨论和批评。

本文在编写过程中,王宝仁教授就文章的文字部分提出一些修改意见,杨辉帮助我作了些理论计算,在此致谢。

参考文献

[1] 严抯非. 用特殊密度仪探测碳氢化合物和地下矿物的奇迹[J]. 石油物探译丛,1989(1):64-68.

[2] 董冬. 艾菲微重力储层油气检测技术——原理、方法和实例:(一)—(二)[J]. 石油勘探与开发,1995,22(2)-(3):86—89;112-116.

[3] MANSON LA. The phenomena of hydrocarbon detection and minerals detection in the earth by the specific density meter,1987.

[4] Inventor cites gravity as oil-finder[N]. The Houston Post, 1985-05-07.

[5] The Affinity System,Copyright,Geophysical Survey Ltd, 1985.

[6] PROTHERO W A and GOODKING J M. A superconducting gravimeter[J]. Journal of Scientific Instruments,1968,39:1257-1262.

[7] GOODKING J M. The superconducting gravimeters: principles of operation, current performance and future prospects[C]//proeedings of the workshop: Non Tidal a ravity changes. Luxemburg: Cahiers du centre Europèen de Gèodynamique ot de sèismolgie, 1991, 3:81-9.

[8] 袁业培,金文丽,金红. 高精度重力探测油气藏的可能性[J]. 石油地球物理勘探,1995,30(1):139-144.

[9] 刘东昌. "艾菲:构建勘探新坐标"——全国微重力勘探技术研讨会侧记[N]. 中国石油报,1995-08-16.

[10] 艾菲系统直接找油方法研讨会纪要[C],北京:中国石油天然气总公司勘探局,1995.

[11] 米哈依诺夫 ИН,王西文. 酒东盆地高精度重力测量预测油气藏项目总结报告(中俄合作项目)[R]. 兰州:中国石油天然气总公司西北地质研究所,1994.

[12] 李盛汉,彭章池,郑毅. 重磁力及土壤地球化学测量在柴达木盆地东部地区的应用效果[J]. 石油地球物理勘探,1994,29(S2):200-208.

[13] 李庆忠. 评艾菲微重力直接找油[N]. 石油物探信息,1996-06-15.

[14] 俞建宝. 论高精度重力直接找油气[N]. 石油物探信息,1996-07-15.

[15] 刘天佑,崔宁,邱绳德等. 高精度重磁测量弱信号分析及其在塔北雅克拉地区的应用. 石油物探,1996,35(2):81-88。

文章编号 303-1

打破思想禁锢，重新审视生油理论

——关于生油理论的争鸣

（为祝贺《新疆石油地质》第 100 期而作）



长年来，我在胜利油田地质处从事寻找石油的工作，对石油地质的基本理论：生储运，盖圈保，有所了解。但是这篇文章还是“班门弄斧”。不少人说：“你是一个搞物探的，何必给人家唱对台戏？”我也知道我这篇文章要得罪很多人，包括我的好友。但是长期来我积累起来的资料使我对目前的有机生油理论产生了怀疑。为了澄清问题，打开找油新思路，我还是决定发表此文。就让理论在争鸣中得到发展吧。

此文 2003 年 2 月发表于《新疆石油地质》第 1 期，作者李庆忠。

摘　要

有机生油论的各种指标，虽然在客观上的确能够指导找油的实践，但它本身可能存在较大的问题。目前的生油理论其实质可能只是一种盖层指标以及和油苗相类似的直接找油指标。直到今天，谁也没有在实验室里证明低温下有机物（不管是陆相还是海相）可以生成石油。本文列举了有机生油理论目前存在的 20 多个方面的矛盾，并指出最近出现不少新的情况却有利于无机生油理论。如果今后石油无机生成学说得到普遍接受，那么，人们将仍应主要在沉积岩中找油，要在盖层下面去找。不过，由于打破了思想上的束缚，就会涌现勇于开拓新区、新层系的勘探工作。人们也会注意去寻找与深断裂有关的油气藏。如果思想禁锢在有机生油论的框框里，就会贻误油气田的发现。

关键词

生油理论　有机成因　无机成因　陆相生油　生油指标　盖层　深部断层

前言

生油理论在石油勘探实践中有着十分重要的作用。长期以来，大多数地质工作者都认为石油是由地下有机物质转化后而生成的。尤其在中国，我们创立了一套陆相生油的理论。多年来，大家把它奉为至宝，似乎不容置疑。

但是，近几年来，出现了不少新的情况，促使人们从新的角度来思考这一问题。在有机生油的问题上，值得我们深入探讨。

笔者认为，目前的生油理论实质上是建立在盖层指标以及与油苗相类似的直接找油指标基础上的找油理论。例如，有机碳、氯仿沥青 A 等指标只是起到了与油苗相类似的找油直接指示的作用（假如分析油层附近的围岩，即使它们是不能生油的红色砾岩，这些“生油指标”肯定也是很高的）。而暗色泥岩厚度等

指标实际上是一种盖层指标及还原程度的指标，好的油层肯定需要一个好的盖层，红色泥岩是氧化环境下的陆相沉积，其中粉砂质颗粒较多，所以不是好盖层；而湖相或海相泥岩，它的颜色被还原成深褐色或黑色，其颗粒极细比较纯净而具有“亲水、憎油性”，才是好盖层。

人们找到油气时，必然发现它的盖层指标比较好，并且周围的有机碳、氯仿沥青A等指标比较高。因此，错误地认为油就是从低温的暗色泥岩中生成的。

也是由于油气大多数情况下是在良好的暗色泥岩盖层下找到，因而“源控论”也应运而生，即认为当今找到的油气藏基本都分布在生油母质的源岩的周围。然而，油气是极容易流动的，事实上所有的油气田目前也都处于不断散失、调整、补充的动态平衡之中。而“源控论”是与这个现实格格不入的。因此，“源控论”之所以被“有机生油”论者普遍接受的原因，却只是“油气田离不开好盖层”而已。

应该认识到，生油理论到目前为止还是并没有完全被研究透。普林斯顿大学地质学名誉教授在为蒂索(B. P. Tissot)和威尔特(D. H. Wette)的专著《石油形成和分布》一书所写的序言中就明确地说：“油气的成因问题……已经成为一个极为重要的实际问题……但这个问题仍然方兴未艾，还有很多令人困惑不解的未知数和不确定性。”[1]

在人类认识客观的道路上，用固定不变的模式去看待复杂的事物是会吃亏的。由于受有机生油理论思想上的禁锢，已经妨碍着目前的找油实践，所以，有必要对这一至关重要的问题展开争鸣。

我国已经有不少地质家认识到当前生油理论存在着较多的问题。张恺先生早就指出了有不少油气藏的形成与“无机生油”有关。张景廉先生又出版了他的专著《论石油的无机生油理论》(北京：石油工业出版社，2001)，这是对当前“有机生油理论”的极好的争鸣著作。

笔者希望通过争鸣，至少使我们对生油理论作多种设想，广开言路，使我们的勘探目标区不要受生油理论的思想束缚，只要有盖层条件，只要有圈闭条件，就值得进一步勘探。尤其是在新疆的准噶尔盆地与塔里木盆地中，寻找与区域性断裂有关的油气藏更是具有很大的现实意义。如果思想禁锢在有机生油论的框框里，就会贻误油气田的发现。

对有机生油说的质疑

（一）蒂索有机生油理论并未被实践证实

蒂索及威尔特等人通过对生油母岩的热裂解试验，证实了在350℃高温条件下，干酪根可以逐渐裂解成烃类，从而建立了有机生油的理论基础。

然而低温下这种转变不能实现，所以蒂索自己也写道：“在实验室中必须增加温度以加快反应来缩短时间，但是目前还没有建立起比较坚实的基础，我们还不能够确定用什么样的时间—温度的关系。”

蒂索自己虽然对他的理论充满了自信，但是在《实验室加热试验》一章里，他不得不承认：“由加热实验所得出的结论，还没有充分把握直接与沉积盆地深部的实际条件相对照。加热实验的主要成果是证实了干酪根在增温条件下能够产生石油组分。实验室实验不能模拟天然的成岩作用，因为在这一阶段除了温度还可能有其他更重要的因素。”[1]

直至今日，除了甲烷等低级烃之外，还没有人在实验室200℃以下的温度条件下，通过对生油的母岩作长期观测，看到哪怕是质量分数为10^{-6}的C_{10}以上的烃类物质生成出来；没有人证明过石油能够在50℃～100℃生成。

G. W. M莱吉姆贝契也认识到：“在地质历史期中，有关生物残体转变为原油的母质的精确的化学、生物和物理作用是知道得很少的。”[2]

实验室中一般在200℃以上才开始出现C_{10}以上的烃类物质，然而伏尔加-乌拉尔含油区的地温只有40℃，大庆油田的地温只有60℃，低温下很难生成石油，于是人们只好用“时间可以补偿温度”的办法来解

决问题。使用了阿累尼乌斯(Arrhenius)方程,这从物理-化学的理论方面是有一定科学根据的。我们承认温度的增加能够加快化学反应的速度,但是到底能起到多大的作用,是需要加以论证的。例如,鸡蛋在温度100℃煮5分钟就熟了,你把它放在20℃的环境里,放它一年,能不能熟呢?

笔者希望从事物理-化学的专家能够根据阿累尼乌斯公式,正规地推算一下,到底时间在多大程度上能够补偿温度。把这个迷解开,看看在60℃温度下,需要多少万年才能生成质量分数为10^{-6}石油。

(二)"康南公式"问题不少

康南(Connan)的t-T公式的出现似乎帮了蒂索的大忙,它似乎已经证明了"时间可以补偿温度",于是大家都使用了它。其实,柯南公式是有问题的,因为它的假设前提是,他引用的那11个盆地12个点子的数据中,已经事先肯定他所分析的那些泥岩与碳酸盐岩已经生了油,而且是在那个年代生成的油(即在逻辑上用结论当成前提),然后来研究t和T的关系,在对数坐标系中拟合成直线,即有:

$$\log_{10} t = 3014 \times (1/T) - 6.498 \tag{1}$$

式中:t——时间,10^6 a;T——绝对温度,K。

其实他只是把当时已经找到的油田,已知它的地温及地层年代,用统计的办法,把散点拟合出一个经验公式。这个公式仅仅用统计法表达了地温与年代的关系,并没有证明油气是按照这个规律生成的。如果油气生成后在原地是不流动的,那么这公式尚能反映一定的生油的规律。但油气是流动的,我们不知道这些油气是什么时间生成的。

如果康南的公式真正符合阿累尼乌斯方程,即化学反应速度符合温度与时间的客观规律的话,那么这个公式应该具有普遍的意义。笔者用大庆长垣及华北歧口洼陷的地层温度及年代代入上式,似乎效果还不错。

为了进一步验证这个公式的正确性,笔者以时间1年,代入上述公式来推算T,则计算所得绝对温度为6052 K,即5779℃,这显然是不合理的。任何岩石在实验室里只需500℃就能在半小时以内全部把烃类热解出来,可见这个公式有问题。

用古生界生油的例子代入这个公式也得到不合理的结果。

黄第藩等也根据我国中新生代油田,推得如下公式文献[4]中T的单位误为℃,应为K:[4]

$$\ln t = 5569 \times (1/T) - 11.64 \tag{2}$$

用华北、四川、柴达木的地层温度及年代代入上式,效果更好。但如果以时间1年来作计算,代入(2)式,则得绝对温度为−2560 K,这更不可能。

用四川威远震旦系气田的例子代入(2)式,得到温度为21℃,又太低了。

据笔者分析,温度—时间的指数关系之所以存在,应该给予另外的解释:可能是因为新地层是在较新构造运动条件下形成的,而新构造运动区地壳活动性强,地温就相对高;新地层的孔隙度大,导热性不如致密岩石好,于是保存着较高的地层温度。

此外,过去多数油田由于受钻井条件的限制,见油的深度一般为1~3 km,由于老地层的资料少,油层温度统计偏低,而新地层则偏高,于是有了温度—时间呈近似指数关系的柯南公式。可见,石油并不是这样生成的。

(三)镜煤反射率不是生油指标

镜煤反射率是煤炭在地温的长期作用下变质程度的指标,其实它也只是一个地温的指示,与油气的成因并没有直接关系。

因为石油在低温条件下生成的前提并没有成立,所以把镜煤反射率的指标当作生油指标,也就没有了基础。此外,近年来事实上也发现似乎具有不同的镜煤反射率的地层都能生油的奇怪现象。

由于在埋藏深度大、地温梯度高的情况下,原油自行分解、裂解,因此在深处往往只能找到气藏。由于

深处岩层很致密，孔隙度很小，因此找到的油气田规模不大，于是得出镜煤反射率高于1.5%对生油不利的结论。埋藏浅的地层往往孔隙度大于25%，这种松散的地层无法阻挡油气的扩散、逃逸，所以形成不了相当规模的油气藏。于是人们又总结出镜煤反射率小于0.5%不利于生油的结论。我国东部油田浅层存在着较良好的盖层，找到了一些油气，镜煤反射率却偏偏小于0.5%，于是总结出"低熟油"的新理论，以为又是理论上的"创新"。

几乎在所有能检测到镜煤反射率的地层中都能找到油气，这正说明了镜煤反射率指标不是生油指标。

（四）"源控论"理论值得怀疑

目前的有机生油理论还有不少矛盾，其中突出的是"源控论"，即人们发现几乎所有的有机生油指标都说明油气田是"近油源"的，也就是运移不远的。还形成了一种新观点，所谓"源控论"——即认为当今找到的油气藏基本都分布在生油母质的源岩周围。

人们已经了解到油气是容易流动的，容易逸散的，可是我们的有机生油理论的维护者们却坚持起"源控论"来。

"源控论"是许多勘探家从实践中总结出来的，按源控论来打探井成功率的确比较高，但是笔者认为，所谓生油指标实质上首先起着一个"间接油苗"的作用（例如有机碳丰度和氯仿沥青A的指标）；其次起着"盖层指标"的作用（暗色泥岩厚度和还原条件），在既有油苗又有盖层的圈闭的地方打井，当然成功率高！笔者不否认目前的有机生油理论能够指导勘探实践，但是这套理论并没有说清油气成因和来源的根本问题。

石油是流动性极活跃的（尤其是天然气），这个基本事实不容置疑。例如，我们在油井中用射孔弹只打穿直径约1 cm的几个小窟窿，就能在几十年里把1个油田的油气基本开采到枯竭。那么为什么有机生成的石油几乎在原地附近，没有走远呢？这就好比我们想寻找一批成年人，结果他们都在各自的摇篮旁边被找到，这简直是不可思议！

（五）生油量的计算只是对可能找到油气量的主观估计

在一些小盆地中找到的石油已经超过过去人们计算的生油量，这又怎样解释？于是有人就解释说："认识是不断地深化的。生油量的估计过几年就要重新计算一次。"实际上，这种算账方法对于知道内情的人早就意识到它不够严谨。所以，最近有人说："计算生油量的精确度只要误差不超过10倍，就算是不错"。

为了满足"客观上"的需要，有些生油指标可以由人随意修改。例如，东西伯利亚，为了勉强解释前寒武系里费阶能够生成油气，他们就说：海相碳酸盐岩的有机质含量只要是0.1%就可以是生油层，甚至说0.05%也可以成为生气层。* 这种指标的灵活修改都是人们心照不宣的。

近年来关于各盆地"油气资源量"的计算十分被称道，往往成为石油勘探部署的理论依据。笔者不反对这种作法，但是应该清醒地认识到，这只是地质家用目前的知识对各盆地能够找到多少油气的一个"估计"而已，并不是生油理论的伟绩。

实际上"生油层厚度""转化系数""聚集系数"，这几个数据都是无法精确定量的，具有很大的主观成分，它们的"乘积"更难说是可靠的了。然而，下面将要讲到，目前所公布的各盆地的生油量实在还不够在地质历史上油气的散失量。

（六）"红色泥岩生油""油气倒灌"的解释有点牵强附会

长久以来有机生油理论尽管有各种矛盾解释不通，但是人们总是不愿放弃它。例如，中亚的红色地层

---

* 李国玉.俄罗斯新兴大油气区（东西伯利亚古老地台考察报告），中国石油天然气总公司赴俄罗斯地质考察组，1995.

中也找到了石油，中亚(苏联)的石油地质专家提出：红色泥岩也能生油。玉门老君庙油田都是红色地层，上第三系底部白杨河组中只有 30 m 巧克力色的泥岩，找不到生油层，于是就来了个白垩系生油，倒灌到志留系及第三系的说法。塔里木盆地叶城柯克亚油田在红色第三系中打出了千吨井，找不到生油层，又解释为它是通过断层与侏罗系沟通，侏罗系生的油侧灌到第三系里来。地球化学家们还找到了油源对比的某些根据。

笔者不反对地下原油在压差的驱动下可以倒灌或侧灌，问题在于他们总不去想想是不是现有的生油理论存在着错误，而一味地排斥无机成因论。

只有甲烷气(沼气)无疑是有机生成的。我国的柴达木盆地东部的三湖地区有涩北气田等一批第四系的甲烷气藏。这方面没有争议。

(七)"干酪根"说质疑

在石油有机生成的理论上，过去在生油母质的认识方面也十分矛盾：从一开始就有人认为石油是由海洋中的浮游动物所生，另一派说是植物生成。后来又有海相生油与陆相生油之争，他们都各有各的根据。接着人们又提出一个新名词："干酪根"，认为它才是生油母质。不管陆相、海相，都能生油。

海相生油理论盛行之时，陆相生油也是被认为是邪说。1967 年，Levorsen 在《石油地质学》(再版)中对已经发现陆相地层中的油气田，他仍认为："这里的石油非常可能是海相地层生成，而后来运移至非海相地层中的。"直到渤海湾许多陆相地层中发现很多油田时，还有外国的知名石油地质专家发表文章，认为渤海湾盆地所发生的情况"是不可能的，是耸人听闻的说法"。可见一种新理论的出现必然会引起旧理论拥护者的反对。[4]

20 世纪 50 年代，笔者曾随一些地质家到新疆喀什至叶城去观察地质露头。那里从上白垩统海相的赛诺曼、土伦、赛诺达特组到下第三系的布哈尔、苏扎克、阿来依、到吐尔克斯坦的一整套海相地层里面，含有大量的动植物化石。可是就是找不到一点油气显示，甚至连一点荧光显示也没有，真令人费解！

这种情况为什么人们又把"源控论"给忘掉了呢？

(八)"生油层"不断深移，证明了人们对生油的认识存在着问题

在找油的实践过程中，许多盆地经历了不断往深层寻找生油层的过程，例如，对我国准噶尔盆地及塔里木盆地的生油层的认识都走过一段"渐进式的路程"。20 世纪 50 年代，在石油地质报告中，人们首先认为是侏罗系生油；60 年代找到克拉玛依油田后，认为是三叠系克拉玛依组生油；后来 80 年代，又说是二叠系生油；最近塔里木又说是石炭系，甚至志留系、泥盆系、寒武系及奥陶系生油、生气。其实，生油层层位的不断下移也正可能说明油气是无机生成，从深部通过断层运移上来的。这便是很早以前 H. A. Кудрявцев 等在《反对石油有机起源假说》一书中所表达的观点。[7]

(九)越来越多的资料证实油气来自地壳深处近年来许多迹象都表明油气目前还在生成，它们沿着深断裂不断上升

墨西哥湾深海区块 330 油田 OS 油层由莫比尔、德士古-雪弗龙公司合作进行强化开采，1972 年以来，共采出数亿桶天然气及凝析油(油当量)。人们发现油质逐渐变轻，生物降解程度愈来愈少的奇怪现象。

笔者这里有一盘美国能源部 GBRN 小组"正在流动着的油田"的录像带*说了以上的事实。于是他们在 1985—1988 年的 3 年时间里作了两次三维地震，通过所谓"四维地震"分析，发现油气从深层逐步沿着断层面裂隙向上运移，补充到开采层中来。在垂直裂缝带里出现纵、横波速度的降低，用 Voxel 透明像素技术可以看到这种上移的通道的图像。当然，这盘录像带里没有说明深层的原油来自何处，但是可以发人

* 美国能源部 Global basins research network(GBRN)："Field of streams" in the deepwater gulf of mexico(墨西哥湾深水区的"正在流动着油田")。

深思。

法国CGG公司也展示了一个通过“四维地震”分析，发现油气从深层逐步向上运移，补充到开采层中来的例子。它们至少说明油气是极容易向上流动的。

因此，人们对油气运移的概念也需要改变一下。一般人都以为油气在水平方向从生油洼陷运移5～10 km，不算多，十分合理；然而，人们往往对垂直运移的普遍性缺乏应有的重视。例如北非的哈西曼沙乌德大油田当年找不到相应的生油层，于是人们说：油源来自几十公里以外的生油层。人们接受水平方向的长距离油气运移，但是比较难以接受垂直方向的更普遍的运移概念。

其实，没有什么值得奇怪的，地下岩层里垂直裂隙多的是！而且愈是深层，裂缝就愈发育。上面所说的录相带里指出：那些深层的垂直裂隙在压差作用下，完全可以造成油气的垂直运移。

大庆油田不断有油气沿基底断裂向上补充、运移，在大庆油田的开发过程初期，就发现油层下部的油水过渡带的底界不是平的。长垣西侧其海拔为－1250 m，而东侧却为－1220 m，相差30 m，尚处于水动力学的非平衡状态，没有人解释清楚这种现象。其实在大庆长垣的西侧有一条南北向的基底断裂，笔者以为是西侧断层在近代还在不断向上补充油源，造成了油水过渡带西深东浅的非平衡状态。它说明了地下原油至今还在不断往上补充、运移。

中原油田兰聊大断层下方坡积粗相带中的白庙产气层和胜利油田陈家庄凸起下面的沙四段粗相带里的岩性油气藏，它们都缺乏合格的盖层，它们之所以能找到油气，必然有着来自深层的油源的不断供给与补充其自然漏失。正好像一个漏斗，只要是灌进去的水多于漏掉的，它就能存满水！这说明目前油气还在不断补充。而且请注意，兰聊大断层下方前梨园向斜中的沙河街生油层的产状都是向西抬起的，有机生成的油气应当向西运移。白庙哪里能够得到气源的不断补充？

再举一例，胜利油田的胜利村构造现在的隆起幅度有150 m，它在东营组沉积末期的隆起幅度只有100 m，另外50 m是在上第三系明化镇组沉积时期形成的。而目前该构造装满了油，可见有不少的油是在最近这10×10^6 a里装进去的。

这几个例子都是说明目前从深层还在不断进行着油气的向上运移补充。

（十）有机说无法解释形成鄂尔多斯的天然气的地下岩石几乎没有一种是绝对不透气的

据B. A. 索柯洛夫理论上测算，在1000 m深处，压力具有10 MPa的几米厚地层中的甲烷气会在1×10^6 a中漏失破坏无遗。

胜利油田对平方王地区沙河街组四段二氧化碳气层作了计算：泥岩盖层厚50 m，孔隙度15%，气的逸散半衰期为7.5×10^6 a。于是，50×10^6 a（始新世距今的年代）就散失了99%！

鄂尔多斯盆地现在已经呈现出一个大气区，含气层主要是中奥陶统马家沟五段的白云岩段，其次是石炭系、二叠系的砂岩储集层。这里的天然气据分析是由石炭系煤层产生的煤成气，也有认为是下古生界原生的气。

我们来分析一下，鄂尔多斯地台是一个十分稳定的台块区，地层倾角不到半度。从早古生代到石炭纪、二叠纪沉积了一套海相到海陆交替相的沉积，中生代继续接受陆相沉积，到白垩纪末盆地就停止下沉，趋于稳定，向东略有抬升。对于下古生界原生的气及上古生界煤成气来说，应该说白垩纪末已经下沉达到最深的位置，它们所生成的油气应该已经到达圈闭里了。陕甘宁的天然气如果由石炭系所生成，则奥陶系里的天然气在白垩纪末也早就漏失光了。即使白垩系沉积完了之后石炭系刚进入所谓的生气门限，那么，白垩纪到今天这么长的时间里，陕北盆地已经不再下沉，当时所生的天然气也保存不到今天。众所周知，天然气的逸散能力极强，几乎一切岩石对天然气都不起封盖作用。我们很难相信陕北的天然气历经70×10^6 a（白垩纪末至今）还能保存到今天。

（十一）前寒武系中找到大量油气

俄罗斯在东西伯利亚的找油实践中，发现在前寒武系（元古界里费阶）及寒武系中找到大量的石油和天然气。到1995年为止，雅库特、伊尔库茨克、克拉斯诺亚尔斯克3个地区初步已探明的石油可采储量有15×10^8 t，气储量已达20410×10^8 m^{32}。虽然人们又千方百计地论证了这里的里费阶存在着很厚的碳酸盐岩及泥岩可以生油，因而说它是“自生自储”的原生油气藏。但是从寒武纪以来，在6×10^8 a漫长的地质历史时期中，这些油气如何能够保存到今日，又使人产生很大的疑问。尤其是天然气，更加不可思议，应该早就漏光了。

（十二）为什么莫氏界面之下还有较高含量的甲烷

中国科学院出版的《科学中国人》1995年第2期由许志琴副院长撰写的文章《伸入地球内部的望远镜》又指出了许多新情况：乌克兰的第聂伯-顿涅茨盆地中，在3100～4000 m深的前寒武系变质基底中，意外地发现了5个生储盖组合，有储量2.19×10^8 t的工业油田。根据其镍矾比（Ni/V）很高及生物标志物分子的质量分数小于10^{-6}级，使无机生油论再次崛起。俄罗斯在科拉半岛的超深井（12262 m），以及德国在波西米亚地块的超深井（9100 m）也各有新的发现。除了发现反射地震法所推断的“康拉德面”不复存在，以及在莫氏界面之下发现还有地球强磁场以外，还发现随着深度的增加，氢、氦及甲烷含量也逐渐增加，并发现还存在一个极端环境（高温高压下）的生物圈，存活着的微生物具有耐温（300℃）发酵的特点，它们在地壳深部仍旧对成岩、成矿及生油起着作用。[5]

此外，地幔里所生成的非生物天然气也是十分普遍的。到1993年底，全球统计已探明的天然气储量为$142\times10^{12}m^3$。然而，据F. G. Dadashev资料，阿塞拜疆东部的220个泥火山于第四纪排出的气体总量（包括爆发期和平静活动期）为52×10^{12}～$370\times10^{12}m^3$（成分为非生物成因的天然气），几乎超过了目前全球已发现的天然气的总储量。该泥火山带从库拉盆地延长到南里海盆地，全长900 km，泥火山的空间分布与深断裂有关（A. A. Lizade，1984）。[9]

据A. H. 克拉夫佐夫研究（1979），在千岛至勘察加火山地带，裂口喷气带长约600 km，含甲烷22%～56%，其次为二氧化碳、一氧化碳及水。估计自8.3×10^6 a以来，共计喷出甲烷气5000×10^8 m^3。[9]

另据Brooks（1979）研究，在加勒比海牙买加水下山脉和凯曼海槽的加勒比海深大断裂附近，发现大量甲烷夹着许多的（0.5%）乙烷、丙烷一起排出。估算每10 d排出气体为1×10^6 m^3，即1×10^6 a为36×10^{12} m^3，此深大断裂长达2300 km，是一条转换断裂带。

（十三）高温高压条件下可以无机生成石油

莫斯科全俄地球物理研究院的B. M. 库多莫夫等在总结了全俄区域地球物理大剖面的基础上，提出陆壳三层结构的新模式：即在花岗岩层与玄武岩层之间，在15～30 km处存在着一层超基性的蛇绿岩层，它具有较低的地震波传播速度和较高的导电率，层内温度300℃～400℃，压力约为200 MPa。他们认为在这样的高温高压条件下可以无机生成石油，有如下反应式：



$$nCO+(2n+1)H_2\rightarrow C_nH_{2n+2}+nH_2O$$

并称实验室已证实在这样的温度压力的情况下，在有Fe，Cr，Co，Ni等触媒作用下可以合成石油，希特勒当年就这样试制过人工合成石油。[6]

库多莫夫等人认为地壳的低速高导层中存在有水，每1 m^3地幔物质中包含有180 kg水和15 kg二氧化碳。水与二氧化碳正是氢和碳的来源。超基性岩在层中产生蛇绿岩化，吸水、膨胀，沿着某些地壳的薄弱地带上升，就把无机生成的石油带到地壳的浅表层位，而在沉积岩中沿着断裂带聚集到沉积岩中。

（十四）在陨石里多次发现了烃类物质

除了地壳深处已经找到烃类物质以外，近年来从天上掉下来的陨石里也多次发现了烃类物质。已经

有许多刊物正式作过报道。最不容置疑的实例是位于斯德哥尔摩西北的斯里扬古陨石坑中，从波罗的海地盾深部的结晶基底岩石中首次获得了石油，基底之上并无沉积岩层。[8]这些资料是深部无机生油无可辩驳的证据。显然石油可以由无机生成。

俄罗斯的 Л. B. 贝利霍夫则认为，既然有机的生命本来也是由无机生成的，为什么石油不能无机生成呢？

（十五）我国地质界也有不少专家主张加强无机生油理论的研究

张恺同志从事多年的板块构造的研究，他从全球众多的资料中总结油气与壳-幔深部结构的关系，指出了 5 种油气无机成因模式。[10,11]

张景廉、朱炳泉采用铅同位素方法对塔里木盆地古生界固体沥青及干酪根作了质谱分析，发现它们的$^{206}Pb/^{204}Pb$为 17.08～18.59，而$^{207}Pb/^{204}Pb$则为 15.466～15.550。因此，认为这些固体沥青具有明显的、无可怀疑的幔源成因特征，并指出塔里木盆地的油藏与深部断裂有着密切的关系。他们还提到志留系古油藏的规模很大，从沙井子断裂东西延伸达 250 km，南北宽 60 km，残留沥青砂岩厚度为 20～67 m，残留沥青储量估算可达 20×10^{8} t，可见原始幔源成因的古油藏必然是规模极其宏大的。[9]

笔者在新疆工作时期，1960 年，克拉玛依油田八区大断裂下盘克 256 井于 2818 m 进入古生界基底，在 2830～2838 m 取心见两处火成岩晶洞中含油，岩性为流纹岩，有石英斑晶，晶洞中含油，四氯化碳试验呈黄色，晶洞互不连通，钻井地质总结报告认为该石油是无机生成的。1966 年，在克 256 井南 4 km 的检乌 8 井 3008 m 经二叠系底砾岩进入古生界基底，在 3021～3022 m 基底岩石中取心又见流纹岩，灰白色，具黑色玻璃质的流纹状结构，有石英斑晶，晶洞中含稠油，加四氯化碳呈浅黄色。这种情况用有机生油论也是很难解释通的。

（十六）叶绿素族及血红素族不能证明石油有机生成

过去有机生油论者批判无机生油论者的最强有力的武器是石油具有旋光性，它含有叶绿素族及血红素族（例如卟啉类族化合物），说明石油不可能无机生成。但这一条理论依据，早在 20 世纪 50 年代就由 H. A. Кулрявцев 所驳斥过[7]。他曾指出：石油是一种极好的溶剂，无机生成的石油在它运移的道路上，完全可以融合、夹带这些年轻的有机物质。他还曾指出：几乎所有的油气田，在其下方一般都有着一些通向深处的断层及裂隙，油气完全可以从下面上来。

目前生油理论的所谓“油源分析”，实际上只是说明原油运移道路上流经了什么地层，夹带着哪个地层的有机质样品而已。由于油源分析使用了众多的先进仪器，分析结果有着广泛的地球化学知识，使人感到应该十分可信。但仍没有搞清这些化学成分、元素结构到底是石油生油过程中固有的，还是后来原油在运移道路上夹带、溶解而来的。这个问题不搞清楚，即使用了科学的手段，其结论也值得怀疑。

（十七）油气主要储集在沉积岩中，不能作为有机生油学说的依据

可能坚持有机生油论的人还要笑话无机生油论者，说：“那么好，你们到花岗岩里边去找油吧！”他们凭着几十年找油的经验，深信既然石油在沉积岩里被找到，那么，显然只能是在沉积岩中由有机物生成。

当然，在俄罗斯的确有人主张到花岗岩基底里去找油。他们列举了美国的爱迪生油田、玛拉、拉帕思、奥依玛莎、埃来伊-依嘎思郭叶等地方已经在进入基岩 150 m 的深处找到油田。只在基岩中见油者有美国的玛温金-维尤。产量很高的有俄罗斯车臣共和国的鲁波内及高斯特良内，非洲的诺依楞巴赫以及俄罗斯的埃来伊-依嘎思郭叶油田，产量高达 3×10^{6}～5×10^{6} m^{3}/d（气）或产油 4600 t/d。据统计，乌克兰包括基岩风化壳，已有 157 个基岩油气藏。美国和加拿大还发现一些古陨石坑含具有工业价值的石油。

然而笔者认为，今后如果石油无机生成学说得到普遍接受，那么，人们将仍应主要在沉积岩中找油，不过由于打破了思想上的束缚，人们会注意去寻找与深断裂有关的油气藏（库多莫夫等人主张首先寻找地壳

低速高导层超基性岩上升的薄弱地带)，只要有盖层及圈闭条件，就有希望找到石油。

(十八)流花11-1油田发现的艰苦历程论证了什么？

我国南海东沙隆起上的流花11-1油田是南海目前最大的油田，探明地质储量1.6×10^8 t，是一个中新统的海相生物礁灰岩储集层含油。该油田距惠州生油凹陷约45 km。1980年，经地震勘探落实，构造面积很大。但31家外国公司却无人看好，认为油源条件差，评价表上"榜上无名"。[13] 1982年，招标时无人感兴趣，只有Amoco公司犹犹豫豫地在最后一天交上标书。在以后两年中，在许多油公司打探井纷纷失利的情况下，Amoco公司对流花11打探井更无信心，对按合同作业提出许多附加苛刻条件[13]。在1985年出现惠州33-1、西江24-3等油田出油后，才勉强于1986年在流花加做地震详查。1987年3月，才开始打流花11-1-1A井，结果揭示油层75 m，试油得高产。同年接着在东西两高点上打井也获工业油流。

油田发现前，有人对在流花11打探井很不理解，认为Amoco公司是不是没有地质家了？出油后又不好解释，于是有人解释为：原油是在生油凹子里生成后，沿着珠海组底部"输导层"远距离运移过来的。

该油田采用25口水平井投产后不几天，很快底水上蹿，不到一个月，日产油量由6.5×10^4桶降为2.5×10^4桶。为搞清出水原因，补做高分辨率三维地震。这次资料品质极高，在1.25 s礁灰岩目的层段地震剖面的最高有效频率达240 Hz(主频约120 Hz)[14]。相干数据体显示发现沿南北大断层有许多"古喀斯特落水溶洞"，地震剖面上又发现多处存在有直立的气烟囱(Cas Chimney)，说明此油田气水活动很厉害。由于气体的侵入造成地震反射的空白带，还有明显的反射层时间下陷(Pull down)。值得注意的是，这种气烟囱很明显是从1.5 s的基底中升上来的，而不是从珠海组底部"输导层"中发出来的。文献[15]中还认为古喀斯特溶洞附近的这些气侵现象已经持续了15×10^6 a。以上的情况说明，流花11油田的生油问题，到目前还存在着许多难以用当今流行的有机生油论来解释的地方。

(十九)和田河气田发现的技术争论

塔里木盆地中的巴楚凸起的南缘有一条长300 km的玛扎塔克大断裂，在其东段和田河附近找到了和田河气田。产气层是石炭系及奥陶系灰岩。这个气田的西面，在色力布亚到麦盖提一带是一个含油地带。整个断裂带是一系列冲断背斜构造，地面出露上、下第三系，局部出露石炭系、二叠系。构造形成时间很新，早古生代是北倾平缓的单斜，晚古生代转为南倾单斜，只是在喜马拉雅造山期后期才发生冲断裂而形成线状背斜。那么这里的油气是哪里来的？用现有的生油理论很难解释得通。

按目前的地化分析认为：和田河气田的气是由南面塔西南坳陷中的寒武-奥陶系中来的，这就很值得怀疑了。早古生代生成的气能够保留到喜马拉雅运动晚期产生的构造里来吗？当断裂带上的构造在喜马拉雅运动晚期形成隆起之时，已经早就过了寒武系、奥陶系大量排烃期。当初在和田河打探井其实也是见到西面的山1井出了气，使人们解放了思想，才上玛4井的。文献[13]指出："1995年上山1井的过程中就曾经有过尖锐的意见分歧，而山1井日产天然气12×10^4 m^3，打破了'新构造不利'的框框。"对这一段话，我认为它还并没有触及生油(气)问题上思想是如何得到解放的。这个例子也提醒人们不要死抱现有的生油理论，应该解放思想，只要有构造圈闭、有储盖条件，附近又有深断裂，便应该上探井试一试。

在塔里木盆地的东部有着不少古生界-前古生界的大型隆起，还有不少侏罗-三叠系的凹陷，打过一批探井，可惜没有发现油气田。长期以来人们对东部并不看好，认为缺乏生油能力：古生界已经过成熟，侏罗系、三叠系地化指标也不高，因此，停止了钻探。2001年，塔指又上去打了英南2井，在3326～3984 m见48层280 m良好气测显示，测井解释3326～3834 m有气层66 m，差气层50.5 m。测试结果：3626～3667 m侏罗系中折合日产气6.9×10^4 m^3，凝析油4.7 m^3。此井井底志留系中也有较好的油气显示(经油源分析认为天然气来自寒武系，原油来自侏罗系煤系地层)。这口井为今后在塔东地区进一步勘探打开了局面。如果拘泥于老的生油理论，就不会打这口井。

（二十）“低熟油”论是对有机说的否定

搞生油研究的人最近提出一种创新的思路，就是我国东部松辽等盆地及西部柴达木盆地存在着不少“低熟油”的资源。

何谓低熟油？笔者理解便是达不到生油门限（镜煤反射率小于0.5%的）条件下生成的油。传统的生烃理论认为，镜煤反射率低于0.5%的源岩不能生成工业油气。那么，既然达不到生油门限，为什么不怀疑一下有机生油理论本身的可靠性呢？

持有机生油论的人的直观想法是：既然这里已经找到了油，而这里的“生油层”的镜煤反射率又不够0.5%，那么结论只能是镜煤反射率小于0.5%的也能生油。然后把这个当成结论，再去分析低熟油的所谓特点。这是一种简单的思维方法。

正像笔者前面指出的，现有的有机生油理论在低温条件下生成石油是不能通过实验室得到证明的。现在自从低熟油理论出来后，人们把生油的温度降低到58℃（鄂尔多斯1600 m）及65℃（松辽1300 m）。

文献[13]中说“低熟油”理论的发展“是我国陆相生油理论的延伸”，认为这是对我国石油工业发展的创新，“它使我国油气资源评价的深度（生油门限）上升了800～1000 m”，生油温度又下降了不少。这个结论是否可以反过来怀疑有机生油理论的正确性呢？

实际上，实验室中在温度200℃以下从来没有生成过C_{10}以上的石油成分，哪怕是极微量的。所以笔者认为目前与其是称为‘有机生油理论’还不如说它只是一种假说（无机生油是实验室里可以证实的）。那么“低熟油”的理论就更应该只能认作是“假说”了。

此外，如果和田河气田气来源于塔西南的下古生界，那么是否又可以提出一个新的概念，即存在着“超熟气”或“超熟油”的理论，于是在所有R_0的地层中都能生成油气了。

（二十一）新构造运动对油气生成，成藏起主导作用

2001年在渤海发现蓬莱19-3大油田，含油面积10 km^2，储量5×10^8 t以上，这是一个以上第三系馆陶组砂岩为主力的储油层，馆陶组披覆在凸起之上，含油部分不在凸起的中央，而在凸起偏北部位，这是由于新构造运动所造成。构造隆起幅度180 m，含油井段长300 m。这里地震剖面上的断层都是“通天的”，断到第四系海底。当然，从有机生油的理论似乎也能解释得通，即东营组及馆陶组湖盆里生成的油通过断裂上升到储集层中来。但仔细一想，这里第四系沉积之前还并没有形成构造，以前生的油气不知跑到那儿去了。那么在第四纪1.5×10^6 a地质时期里能再把新构造装满油吗？2000年，又在附近找到CFD11等5个油田，这些油田都是新构造运动的产物。

新构造运动起主导作用说明了油气在喜马拉雅运动晚期的运移规模是相当大的。

再请想一想，绝大多数油田的现今构造形态决定着油气藏的分布范围。这正是说明油气是十分活跃的，至今还处在不断漏失、补充、调整的过程中。反过来说，如果油气不流动，或者流动得慢，那么现今构造对找油的意义就不会如此大，人们用地震方法找油的理论依据也要动摇了。

（二十二）每个油气田至今还在不断散失

莺歌海东方11及乐东等气田目前还在不断的散失天然气。2001年，台湾7.3级地震发生之后的几天里，地球资源卫星的照片上可以清晰地看到这些气田在向海洋里释放天然气（龚再生，2001）。然而，东方11-1等气田目前还基本上是充满气的，还有近1000×10^8 m^3的储量，如果没有天然气补充则早就散光了。

再如，胜利村油田有50 m的隆起幅度是明化镇组沉积末期才形成的，目前都装满了油；大庆长垣底部油水过渡带的海拔东高西低，相差20 m，还继续在动态平衡过程中；濮阳的白庙在兰聊大断层下方粗相带中竟然还找到气田；和田河气田直到喜马拉雅运动末期才有构造隆起，也能装满天然气。

凡此等等现象，不得不发人深省。我们必须把一个油气田当作是至今还在不断漏失的一个动态平衡

过程中的产物。

古油气藏的破坏规模很大，有不少也是用有机生油论所不能解释的。

再设想一下，在油田的开发过程中，只要在井下油层中射开 20 个直径为 1 cm 小孔，就能在 30～50 年里完成油田一次采油，采收率达到 30%～40%（而 50 年在地质历史上只是一瞬间而已），那么过去断块油田由于断层不封堵所散失的油气又有多少？

每个油气田至今还在不断散失，我们必须把一个油气田当作是至今还在不断散失、调整，又不断往里补充的一个动态平衡过程中的产物。因此，今构造才能对油气起主要控制作用。有机生油理论到目前所计算的生油量恐怕是不够这个散失量的。

结语

在科学发展的历史上，常有这样的事情发生：人们以为是千真万确的知识后来被认为是错误的。

我们不能认为有机生油理论已经不容争辩了。相反，有机生油理论在指导进一步油气勘探方面，愈来愈显得走进了“故步自封”的境界，它指导不了 21 世纪的油气发现。[17]

(1) 以上 22 条已经足以说明，目前的有机生油理论存在着很多矛盾，它只能称作是一种“假说”，并没有被理论证实。而且近年来还使油气勘探者思想受到束缚，妨碍了对新区、新层系的勘探。

所谓有机生油论的各种指标，虽然在客观上的确能够指导找油的实践，但是它（不管是陆相生油还是海相生油理论）本身可能是错的。它实际上只是起到了与油气苗相类似的找油直接指示作用，暗色泥岩厚度及还原指标实际上是一种盖层指标。“源控论”也是基于上述两方面的原因而产生。

笔者认为找油的关键是：第一要有区域性好盖层，岩盐层最好，局部好的泥岩盖层也行；第二要有储集层及圈闭条件；第三，附近有深断裂，或者断到基底的断层。在这 3 条的基础上就可评价后择优打探井（暂时不要去考虑生油的成因），这样我们的找油思路就会更宽广一些。

生油的学说研究可以从长计议，但是找油时不要一元论（有机说），至少应该作两种设想。即我们今后一方面仍旧可以使用现有的“有机生油指标”，但是不迷信它；不要先入为主地只在“生油层”附近打井，记住油源可能从深部而来。积极甩开钻探，开辟新区、新层系的找油工作，这才是出路。这样可能要比坚持僵化了的有机生油论要好得多。

(2) 不可否认，目前有着种种迹象表明，油气来自地壳及上地幔深处。今后如果石油无机生成学说得到普遍接受，那么，人们仍应主要在沉积岩中找油，不过由于打破了思想上的束缚，人们会注意去寻找与深断裂有关的油气藏。尤其是在新疆的准噶尔盆地、塔里木盆地中，寻找与区域性大断裂有关的油气藏更是具有很大的现实意义。例如，准噶尔盆地目前所找到的油气储量绝大部分不在背斜里面，而是集中在克乌大断裂带上。南从小拐开始，经红山嘴、克拉玛依、乌尔禾直到夏子街及石南地区。可见区域性大断裂既控制着沉积及构造的发展，又控制着油气的生成与聚集。

1994 年，笔者曾经就塔里木盆地勘探过程中的地质综合研究问题发表看法：认为那种只依靠地震勘探找鸡蛋（背斜），有一个高点打一口井的做法恐怕是很不全面的，并提出地质家的思路应该开阔一些，以准噶尔盆地为借鉴，寻找更大的找油目标——区域性大断裂带。例如，塔里木盆地的玛扎塔克断裂带及吐木休克断裂带就很值得加强勘探。1996 年，和田河气田的发现证实了笔者的这种观点。现在笔者认为沿着这条玛扎塔克大断裂，从和田河气田向西到古董山、海米-罗斯塔克、麦盖提到色力布亚一带都是有利含油气带，西端还是近期寻找黑油最现实的地方。同样，沿着塔中隆起一号大断层及塔东隆起北界断层将是今后有利的勘探方向。

(3) 当然，生油理论还需要进一步深入研究。在这一过程中切忌用一种学说压制另一学说，不要迷信权威人的结论，不要怕承认无机生油会影响过去“陆相生油”理论的声誉等因素来限制我们的研究思路。应该抱着勇于追求真理的态度，来做求实的讨论。

(4) 此外，还应在实验室里做生油试验，用时间代替温度的理论来做论证，看看有机物到底能不能生成石油。我建议做一次试验：在低温条件下观测它 1～2 年，如果看到生出质量分数为 1×10^{-6} 的石油含量，我们就可以证明一万年后会有百分之一的石油生成。同时也可以重复高温高压条件下生油的试验，进一步研究在什么样的情况下，可以满足地壳中生成油气的条件。

本文的目的在于抛砖引玉，想引发大家来深入讨论，以上说得不正确的地方希望地质家们加以指正。

参考文献

[1] 蒂索 B P，威尔特 D H. 石油形成和分布[M]. 2 版. 徐永元，甘克文，郝石生等，译[M]. 北京：石油工业出版社，1989.

[2] 莱吉姆贝契 G W M. 石油的成因(1975)[J]. 石油勘探与开发，1978(S1).

[3] 黄第藩，李晋超. 中国陆相油气生成[M]. 北京：石油工业出版社，1982.

[4] 胡见义，黄第藩. 中国陆相石油地质理论基础[M]. 北京：石油工业出版社，1991.

[5] 许志琴. 伸入地球内部的望远镜——大陆科学钻探[J]. 科学中国人，1995(2)：11-14.

[6] 库多莫夫 B M. Antistratiform Model of Oil and Gas Bearing Sedimentary Basin of Continental Crust [M]. Moscow：VNII Geofizika. 1995.

[7] 库德梁采夫 H A. 反对石油有机起源假说[M]. 北京地质勘探学院石油教研室，译. 北京：科学出版社，1958.

[8] 殷德智. 世界油气勘探新领域[J]. 石油物探信息，1997(2).

[9] 张景廉，朱炳泉. 新疆塔里木盆地干酪根固体沥青的铅同位素、地球化学特征及塔里木原油幔源非生物成因的讨论[J]. 甘肃地质学报，1997(S1)：84.

[10] 张恺. 论板块构造旋回与油气壳-幔深部成因说[J]. 新疆石油地质，1995，16(1)：1-9.

[11] 张恺. 论地球演化的板块构造阶段与油气起源的演化及其全球分布富集规律[J]. 石油勘探与开发，1990，17(5)：1-7；1991，18(1)：1-6.

[12] 张恺. 油气成因二元论与油气勘探新准则[J]. 新疆石油地质，1996，17(4)：303-308.

[13] 邱中建，龚再生. 中国油气勘探[M]. 北京：石油工业出版社，地质出版社，1999.

[14] STORY C，PENG P，HEUBECK P，et al. Liuhua 11—1 Field，South China Sea：A shallow carbonate reservoir developed using ultrahigh-resolution 3-D seismic，inversion，and attribute-based reservoir modeling[J]. The Leading Edge，2000，19(8)：834-844.

[15] 依·姆·沙赫诺夫斯基. 油气成因说的现代概念[J]. 国外油气勘探，2000，12(3)：266-270.

[16] 张景廉. 论石油的无机成因[M]. 北京：石油工业出版社，2001.

[17] 张景廉，冯有奎，李相博. 无机生油理论与 21 世纪中国油气勘探战略[J]. 新疆石油地质，2002，23(3)：248-251.

文章编号 303-2

关于油气勘探中石油生成的理论基础问题

——与无机生油论者商榷

黄第藩、梁狄刚



果真我的文章马上遭到了坚持有机生油论者的反对。他们称："有机生油理论已经在分子级的水平上查明了石油及沉积有机质的组成和分布特征，取得了油与烃源岩之间可靠的成因联系的证据，是相当完整的科学理论体系"，似乎不容再置疑了。于是，我立即又写了下一篇文章答复他们。

我把他们的文章转登在这个文集里，是为了供大家来评判。我相信真理总是在争议之中得到发展的。

此文刊发表于《石油勘探与开发》2005 年第 5 期。

摘 要

针对某些无机生油论者对有机生油论提出的挑战中的部分论点进行讨论，包括现代有机生油理论体系及其实践、现代生油理论的科学性、勘探中油源的重要意义、鄂尔多斯盆地大型天然气田的成因、无机气的成藏问题以及对大庆油田、基岩油藏和未成熟石油的认识等，通过这几方面的讨论，就石油生成的理论基础问题与无机生油论展开论战。

关键词

有机生油论　无机生油论　油气勘探　干酪根降解　未成熟石油　基岩油藏

引言

自从 1877 年俄国化学家门捷列夫提出石油矿物成因假说以来，有机生油说和无机生油说之间的论战已进行一个多世纪了，仍将继续下去。[1] 20 世纪 50 年代，以苏联著名无机生油论者 Кудрявцев H A 为代表，展开了关于油气有机起源与无机起源的热烈争论。[2] 从 20 世纪 60 年代开始，有机生油说取得了长足发展，**大量新的分析实验技术被引入有机生油研究领域，在分子级的水平上查明了石油及沉积有机质的组成和分布特征，建立了具有普遍意义的沉积有机质热演化成烃（油气）模式**，取得了油与烃源岩之间有着可靠的成因联系的证据，从而在 70 年代创立了科学的有机生油学说——**沉积物中不溶有机质干酪根热降解成烃**（油气）学说。这一学说为模拟实验、化学动力学研究成果及油气勘探实践所证实[3]。在此基础上，相应产生了一系列实用的找寻油气的可靠指标（找矿准则），其中最基本的一点就是：有机质丰度高的优质成熟—高成熟烃源岩发育的地区必然是找寻大油气田的有利场所。这一生油学说深刻地揭示了油气形成和

分布规律，成为石油地质科学的基础理论之一，其本身也从假说阶段发展成为一种新的相当完整的科学理论体系，被越来越多的有机地球化学家、石油地质学家和勘探家所接受。20 世纪 80 年代以来，无机生油学说再次被一些学者所关注，并继承性地产生了 3 个主流学派，即油气宇宙生成说或称为地球原始大气凝聚说[4,5]、地幔脱气说[6−8]和费-托催化合成说[9−11]。实际上，这 3 个学派可视为一个无机生油学说序列或完整的假说体系，概括地说就是在距今 36×10^8～46×10^8 a 前的地球形成初期，原始大气本身就富含 CO、CO_2、H、H_2S、SO_2 和 CH_4 等烃类。它们凝聚在地幔之中，在地壳板块活动过程中，那些凝聚在上地幔软流层（包括所谓中地壳低速低阻层）中的挥发性成分，沿着各种深大断裂带发生了强烈的脱气作用，并经费-托催化合成反应，由 CO 和 H 相化合而形成油气。

20 世纪 80 年代，无机生油论或无机和有机二元生油论在我国也有重新兴起的趋势。张景廉[12]、郭占谦[13−15]、王先彬[16]、符晓[17]、张恺[18−20]、栾作峰[21]、杜乐天[22]和李庆忠[23]等都发表过有关油气无机生成的文章。

2003 年，笔者有幸读到崔永强先生在中国石油勘探年会（2003 年 11 月，敦煌）上散发的文章《中国油气勘探向何处去?》。该文认为：21 世纪中国油气勘探仍以有机生油理论为基础是没有出路的，必须转到无机生油的轨道上来才可持续发展。2003 年，李庆忠先生在《新疆石油地质》上发表了题为**《打破思想禁锢，重新审视生油理论》**的文章，认为有机生油理论已经“僵化”、“故步自封”，“它指导不了 21 世纪的油气发现”，“由于受有机生油理论思想上的禁锢，已经妨碍着目前的找油实践”，近年来“还妨碍了对新区、新层系的勘探”，等等。该文大力倡导无机生油说，对有机生油理论提出了 22 点质疑。[23]本文对上述两篇文章的论点予以回应和商榷。

一、有机生油学说的实践

沉积物中不溶有机质干酪根热降解生烃学说，以其强大的生命力毫无例外地**被国内外石油公司所接受**，并用以指导油气勘探，屡屡取得显著成效，大大提高了勘探的成功率，极大地促进了世界石油工业的发展。世界上尚未见哪一家石油公司敢于把自己的油气勘探工作置于无机生油理论的基础之上。李庆忠那种认为“蒂索有机生油理论并未被实践证实”的说法[23]是缺乏根据的，甚至他本人在同文中也承认“有机生油论的各项指标在客观上的确能够指导找油的实践”[23]。

“实践是检验真理的标准”，下面看看世界石油工业在这一新的石油有机成因学说创立前后的发展情况。20 世纪 70 年代，当时世界的剩余石油可采储量约为 820×10^8 t，到了 20 世纪 90 年代猛增到 1400×10^8 t，年产量也从 27×10^8～28×10^8 t 上升到 33×10^8 t 的水平，储采比亦从 28 左右上升到 42～46（见图 1a）。20 世纪 70 年代有些学者大喊能源危机，说世界石油只能采 30 a 了[石油天然气极限用量研究协会（ASPO），1973]，可 30 a 后的现在，新增的剩余可采储量还能采 45 a，笔者认为到本世纪的下半叶石油还是不会枯竭。世界天然气工业的发展更是如此。1970 年天然气剩余可采储量为 39.4×10^{12} m^3，1980 年达到 74×10^{12} m^3，20 世纪 90 年代翻了一番，达到 140×10^{12}～150×10^{12} m^3，年产量从 1.3×10^{12} m^3 增

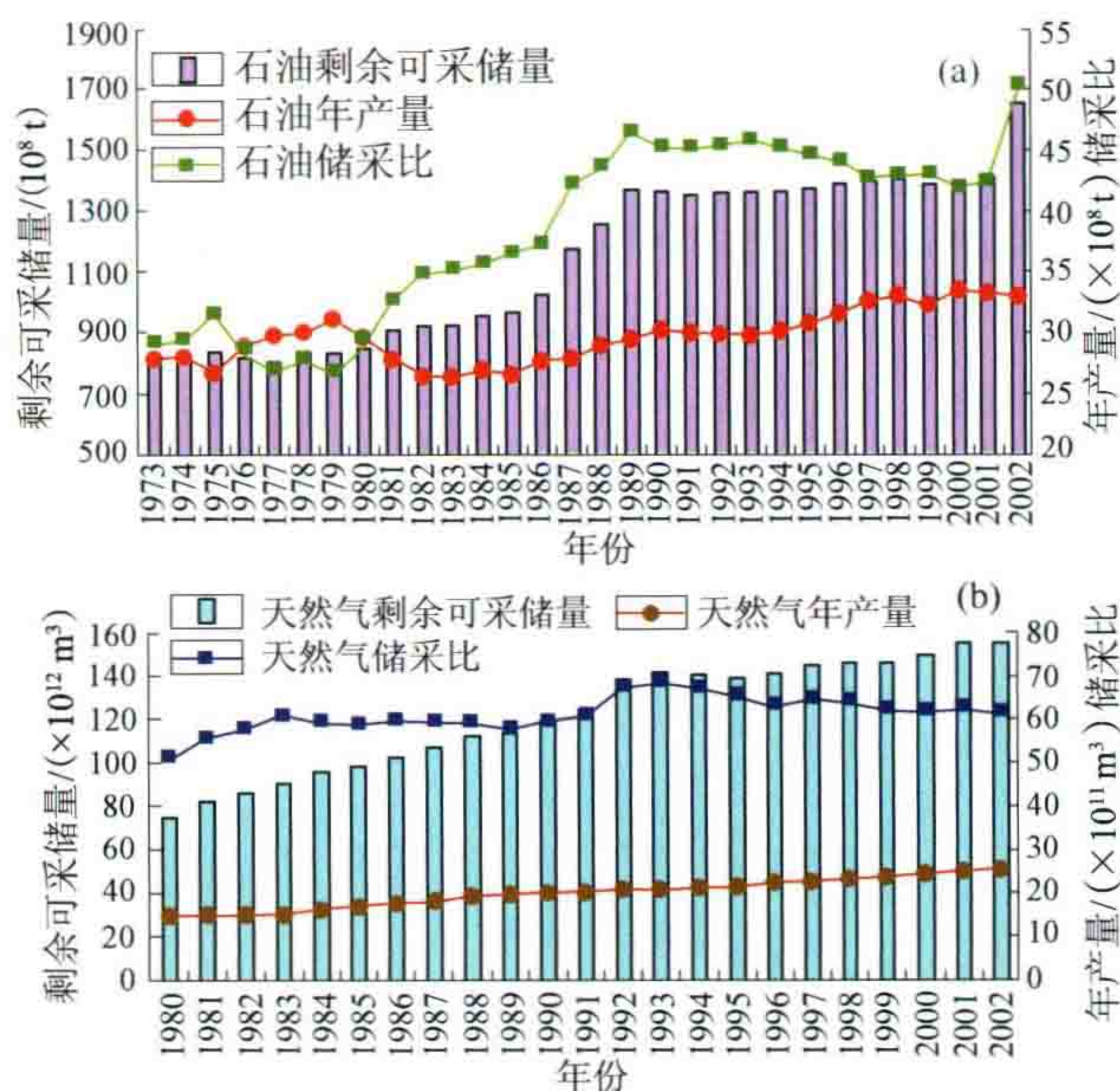


图 1　1973—2002 年世界和 1990—2002 年世界天然气的储量、年产量和储采比变化图

（a）石油（资料来源：美国《油气杂志》历年年终号）；
（b）天然气（资料来源：BP 世界能源统计评论，2003）

至 2.5×10^{12} m³，而储采比从 30 增至 61～68[图 1(b)]。

在陆相有机生油理论的指导下，我国不仅在 1959 年发现了第一个世界级的陆相特大型大庆油田，而且使得我国石油的储量和产量都达新的水平。由图 2 可见，我国 20 世纪 50 年代至 60 年代的石油新增探明储量每年大多为 $1\times10^8\sim2\times10^8$ t，70 年代为 $3\times10^8\sim4\times10^8$ t，1983—1992 年每年新增 5×10^8 t 以上，1993 年至今每年新增保持在 $6.5\times10^8\sim7.0\times10^8$ t 以上水平。产量 1970 年约为 3000×10^4 t，1978 年上亿吨，以后逐年递增，2004 年已达 1.74×10^8 t。20 世纪 70 年代天然气新增年探明储量仅 200×10^8 m³，80 年代约为 $300\times10^8\sim400\times10^8$ m³，90 年代达 1500×10^8 m³ 左右，而 2000—2002 年每年新增都在 4500×10^8 m³ 上下。

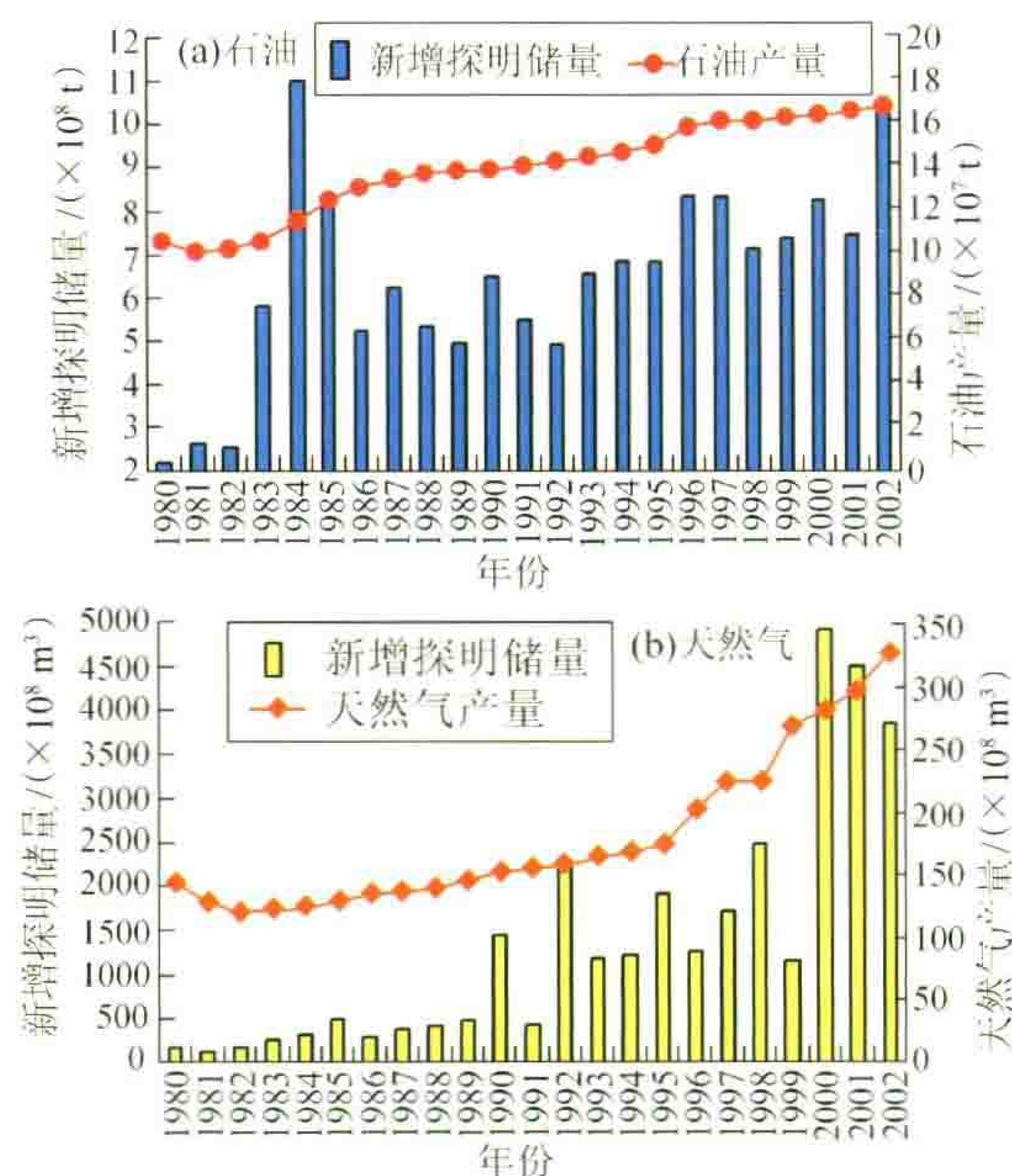


图 2　1980—2002 年中国石油和天然气探明储量和年产量图

诚然，上述国内外石油工业的发展还有石油地质其他学科新理论的贡献和技术进步、创新的巨大推动作用，但是在这一发展历程中，新的有机生油气理论（在我国还有陆相生油理论和煤成油气理论）的贡献是功不可没的。

新的石油有机成烃（油气）理论已经成为世界上油气勘探决策的重要的依据，并且正在促进油气勘探向更广阔的领域和更深的层次发展。新增油气可采储量与采出量基本持平（中国的石油）或超过采出量（世界油气和中国的天然气）的趋势仍然存在，在那些存在大规模优质成熟—高成熟烃源岩的地区还没有找不到大规模油气聚集的实例。在这种情况下，崔永强说，石油有机成因学说“困难重重，举步艰难”，“已经逐步失去了它存在的空间”；张景濂教授 2001 年写的《论石油的无机成因》一书“宣告了油气有机成因学说的终结”。[12]这并不符合客观存在的实际。尽管新的石油有机成因理论体系在今后的勘探中还会得到进一步充实和发展，但现今它正在有力地指导着、支持着国内外油气勘探工作的开展，这是毋容置疑的。笔者历年同世界各大石油公司的交往中，在现代石油有机生成理论方面都是有**共同语言**的。

有人估计“中国油气资源的现有储量将不足 10 年消费”。这一估计是过分悲观了。现今中国石油的储采比是 14，每年探明可采储量 1.8×10^8 t 左右，采出和探明基本持平，估计 14 年后我国石油的储采比很可能与世界的情况一样有所增长，达到 16～18 左右。因此，21 世纪前 30 年，中国石油储采比还会继续保持在较高的水平。

但毕竟应该看到，中国是以陆相生油为主的国家，构造复杂，大型沉积盆地少，而国外则是以海相生油为主的。所谓陆相就是湖相，湖比海的规模要小，是不言而喻的。因此，中国缺少像北非-中东、前苏联、南美、北美那样超大规模的海相含油气域。这是无可奈何的。因此，立足国内又走出国门努力开拓国际油气市场，从国际油气资源中取得必要的份额，应该是我国石油工业可持续发展的重要战略决策。为了弥补我

国从 1993 年开始的越来越大的石油供需缺口，今后石油的进口量将会有较大增长，预计到 2010 年石油的进口依存度将超过 60%，甚至达 70%左右，这确实会对我国经济安全构成较大威胁。但也不必惊慌，因为这是不可避免的、必然的发展趋势，降低风险，认真对待就是了。日本这个经济大国也是一个贫油国，历来 95%以上的石油靠进口，现在还出高价与我国争夺西伯利亚的输油管线。美国现在 54%的石油靠进口，到 2020 年依存度将达到 65%以上，其进口量大大超过我国，依存度和我国差不多。相信中国人在跨国石油战略上是不会输给他们的。

那么，中国油气勘探向何处去？笔者认为**应该继续充实和发展新的油气有机生成的理论体系**，向更广阔的领域和更深的层次进军，向非常规油气藏进军，向国际石油市场进军，迎接我国石油工业的更大的发展。相反，如果目前以无机生油理论调整我们的油气勘探战略，是缺乏科学依据的，也将是一场灾难。无机是能生气的，有 CH_4、CO_2 和 He 等，但要形成较大规模天然气聚集却难，**而有可靠的幔源科学证据的无机生成的油田，迄今世界上一个也没有见到。**

石油中有数千种有机化合物，它们都是地质历史中生物（特别是水生藻类）死亡后自然埋藏、蚀变的产物，保留有丰富的生命印迹（地球化学化石），具有特定的组成、分布和构型。可以说，没有地球上 16×10^8 a生物的演化历程，没有生物中有机分子为适应自身生理的需要和环境的需要，由低级到高级的进化，就没有石油；没有植物征服陆地和湖泊的形成与发展，就不会有陆相高蜡油。石油和煤都是特殊的生物被动成矿作用的产物，都是生物死亡之后转变而成的化石燃料，两者主要的差异只不过是煤源于高等植物，原地成矿，石油主要源于低等水生生物，异地运聚成藏。

虽然太阳系其他行星上并不乏 CO、CO_2、CH_4 和 H_2 等气体，也不乏火山活动，可是未曾有过生命也就没有石油。迄今尚没有哪怕一个油田的实例被证实是无机成因的，并取得它是幔源气体合成的可靠的地球化学证据，仍然仅限于实验室的实验和地质学的假说、推论是不够的。当今地球化学已经发展到这样的水平，以至在地球上拣到一块陨石就可以准确无误地判断它是否来自火星（已有 28 块）或是月球或其他天体。如果真有来自地幔的油田，是不难获取这样的地球化学证据的。笔者真希望能见到这样的证据。至于地幔喷射流中可能存在水煤气费-托催化合成反应（Fischer-Tropsch synthesis），生成一些直链烷烃[$n\mathrm{CO}+(2n+1)\mathrm{H_2}\rightarrow\mathrm{C}_n\mathrm{H}_{2n+2}+n\mathrm{H_2O}$]，但这绝不能等同于天然石油，只是类似石油中某些汽油和柴油馏分而已。更何况在这种可能存在的无机合成烃类中，是找不到生源标志物（生物标记化合物）并取得同位素证据的。

二、关于干酪根热降解成烃理论的科学性问题

李庆忠提出，作为生油理论基础的蒂索和威尔特的生油母岩热裂解成烃实验只是证实了在 350℃高温下干酪根可以裂解成烃，而在低温下这种转变不能实现，也不是时-温补偿所能解决的问题。

的确，“没有人（在实验室中）证明过石油能够在 50℃～100℃生成”[23]，因为这并不是成熟石油生成的温度范围。而李庆忠谈到“大庆油田的（成烃门限）温度只有 60℃”，是不足为据的，因为这是现今门限温度，如果换算为白垩纪末（距今 6.5×10^7 a）的古门限温度应在 **140℃左右**。柴达木盆地旱 2 井上新统沉积后 4.5 Ma 的成烃门限地温值是 130℃，约 9.0 Ma 达到成烃峰值，相应地温为 160℃。就全球一般情况而言，当沉积有机质埋藏 4～10 Ma，地温达到 **120℃～140℃时**，干酪根就开始成熟产烃了，180℃（相当于 R_0 值为 1.3%）达到液态窗下限，而 200℃（相当于 R_0 值为 2.0%）达到湿气的下限。当然，世界上也有间隔时间很长或很短的实例。如果一个沉积盆地地热梯度较高，沉积速率较快，譬如靠近大洋板块俯冲带的盆地，则沉积有机质达到成烃门限所需的时间就短；反之更长，甚至达 3×10^8 a 以上。如北撒哈拉盆地哈西迈萨乌德大油田（图 3），其下志留统油源层沉积后一直没有深埋，甚至还遭受过剥蚀，直到三叠纪形成了巨厚的膏盐盖层，又有厚达 3000 m 的侏罗系和白垩系沉积盖层形成，即 3×10^8 a 之后下志留统烃源岩才进入主成烃期的演化阶段，形成了大油田。李庆忠提到这个油田时，提到油气是从几十公里以外长距离运移而来的观点，其实志留系油源层就存在于油田翼部。

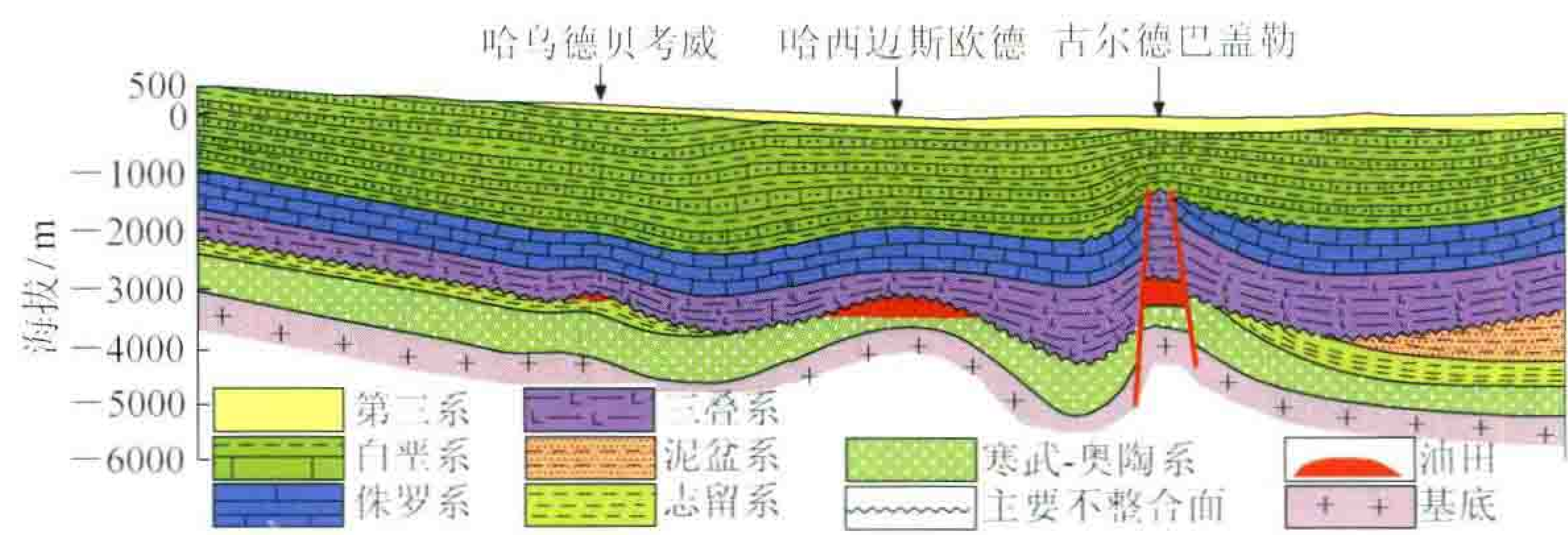


图 3 哈西迈萨乌德地区(阿尔及利亚)的地质横剖面图

图中显示寒武一奥陶系油藏和油源岩(志留系),三叠系为巨厚的膏盐盖层

(据 Poület and Roucaché, 1969)

李庆忠说:"直至今日,除了甲烷等低级碳氢化合物之外,还没有人在实验室 200℃以下温度条件下,通过对生油的母岩作长期观测,看到哪怕是质量分数为 10^{-6} 的 C_{10} 以上的烃类物质生成出来!"这未免过于武断。近的不说,国内较低温度的成烃模拟实验也不说,早在 28 年前蒂索就利用巴黎盆地下托尔阶页岩做过时间长达 90 d、180 d 和 270 d 的 180 ℃、200 ℃和 220 ℃的成烃模拟实验(参见文献[3],129 页),并发现 180 ℃时,1 d 到 30 d 的生成量是 $5.9\times10^{-3}\sim8.8\times10^{-3}$,而 270 d 的生成量为 1.28×10^{-2},温度稍高,生成量明显增大,大约 200℃时的生成量是 180℃的 1 倍,220℃的生成量是 180℃的 2 倍(见表 1)。

表 1 不同加热温度下托阿尔统页岩(巴黎盆地,费科库尔特)所生成的沥青(烃类+胶质+沥青质)[3]

时间/d	不同加热温度下生成的沥青(在原始有机碳中)/(mg/g)		
	180℃	200℃	220℃
1	5.9	6.8	9.2
3	6.6	8.7	13.1
10	6.6	9.2	14.0
30	8.8	14.8	21.4
90	10.4	12.2	30.0
180	10.7	22.2	30.4
270	12.8	21.2	36.2

可见只要把实验时间放得长一些(即便是 270 d 对地质时间而言也只是一瞬),实验室中就可以在 200℃以下实现干酪根热降解成烃。这个温度与实际的地质的成烃门限温度相比,其差值并不像李庆忠认为的那样高达 250℃~300℃,只不过是 40℃~50℃而已,何况已知油气层的最高地温可达 210℃~230℃(Зологов А Н, 1984)。同时,这一差值也不难理解,因为不可能把实验的反应时间拖得很长很长,而正如蒂索所说:"生油从来不是一个突变现象,它是连续化学反应的动力学机制的结果,需要持续一定的时间。快速的生油约要 5~10 Ma。"再者,石油的生成除了时间和温度的条件之外,还有一些不容忽视的因素,如油源岩中黏土矿物和金属的催化作用、自由基的参与、有机质的自催化作用和脱除杂原子基团的物理化作用和生物化学作用,这些因素共同作用的结果都将明显降低干酪根的反应活化能,降低反应的温度。

人们早已发现,在世界上所有含油气盆地中,沉积有机质随埋藏加深,都会经历一个成烃演化过程。如果说这一客观规律存在的事实也需要用实验去证实,岂不是舍本求末。干酪根热降解成烃学说正是根据沉积地质体中残留的有机质成烃演化的"化石"记录,加上人们的综合分析和逻辑思维,上升到理论的高度而提出的,要想在实验室中简单的条件和极其有限的时间里完全重现这一复杂而漫长的、基本完成因而消失了的过程,基本是不可能的。生油模拟实验主要是证明了沉积有机质的热降解可以产生类似石油的物质,证明了沉积不溶有机质——干酪根是可以提供油气生成的物质基础,而不是去证实过程的本身。同样,在地球 46×10^{8} a 的形成和演变的历史中,对前 20×10^{8} a 的太古宙的演变已难以考查,知之甚少,而对后 26×10^{8} a 发生的种种运动,如造山运动、岩浆活动与成矿、大陆漂移与全球板块的碰撞和俯冲、巨大陨

石撞击地球造成生物大规模灭绝，以及其他一系列重大的地质历史事件等等，又有哪一件是实验地质能够复制的呢？若因此而否定目前的种种地质学理论，那么地质学将是一片空白。

三、关于石油勘探中油源的重要意义

数十年来，某些石油无机成因论者尽管强调石油的无机生成，但又否认任何油源(包括无机油源)对石油勘探的重要意义。

李庆忠认为，“由于油气田离不开好盖层，目前的生油理论实质上是建立在盖层指标基础上的找油理论”，“即使它们是不能生油的**红色砾岩**(疑为泥岩之误——笔者注)，其生油指标肯定也是很高的。”这完全是主观臆想，世界上任何油气田的红色盖层都没有检出过可达油源岩下限的生油指标。我国著名的老君庙油田(玉门)3 组第三系红色泥岩盖层就是一个典型实例。在我国数十年的油气勘探中，一直坚持对“生储盖，运聚保”这六大条件的研究，以指导勘探。把有机生油理论的实质只当作盖层理论来对待，岂不偏颇。**李庆忠是一位地球物理勘探家，提出“只要有盖层条件，只要有圈闭条件，就值得进一步勘探”**，这是不考虑油源条件、只强调圈闭的勘探指导思想，已经影响了中国油气勘探数十年，打了不少空构造，降低了勘探成功率。这种观点与前苏联著名无机生油论者库德梁采夫半个世纪前提出的“Кудрявцев 规则”相同，即“在有好的储集层和圈闭的地层中，就会出现工业性油气藏”[2,8]，似乎油气源无处不在。为什么无机生油论者在石油勘探中只强调储集层和圈闭条件，而置油源于不顾？这的确令人费解，但又有其必然，因为他们所主张的油源区处在地球深部数十千米地壳之下，看不见，摸不着，一旦喷出，必然成灾，只好不要去管它了，打井就是，总有碰上油的时候。这也暴露了无机生油论的实践问题并未得到解决。

近 30 a 的勘探实践证明，这种“规则”不能指导油气勘探，而无数成功的实例都是把是否有良好的有机油源条件作为勘探前提的。在 1994 年塔里木勘探技术座谈会上，黄第藩就针对这种**“唯圈闭论”**的勘探部署提出过不同意见，指出“这些构造打下去很可能是空的，因为没有油源”。次年勘探的结果，几口井都打空了，证明了这一预测。这种以盖层理论取代生油理论，除了自生自储的油藏外，都难以成立，而那种认为只要有盖层和圈闭条件就值得勘探的论点更不可取。我国可以找出不少有关的导致勘探失败的教训，再不能重蹈覆辙了。例如，酒泉盆地的酒西坳陷和酒东坳陷之间有一个大型的文殊山-嘉峪关隆起(图 4)，其面积只略小于酒西坳陷，其上的文殊山构造与老君庙构造带同期形成，也有与老君庙油田相当的第三系红色储盖组合，唯一致命的不足就是附近没有类似青西凹陷的那套白垩系油源层，结果 20 世纪 50 年代对它的钻探(文 1 井和文 2 井)失败了，构造是空的。

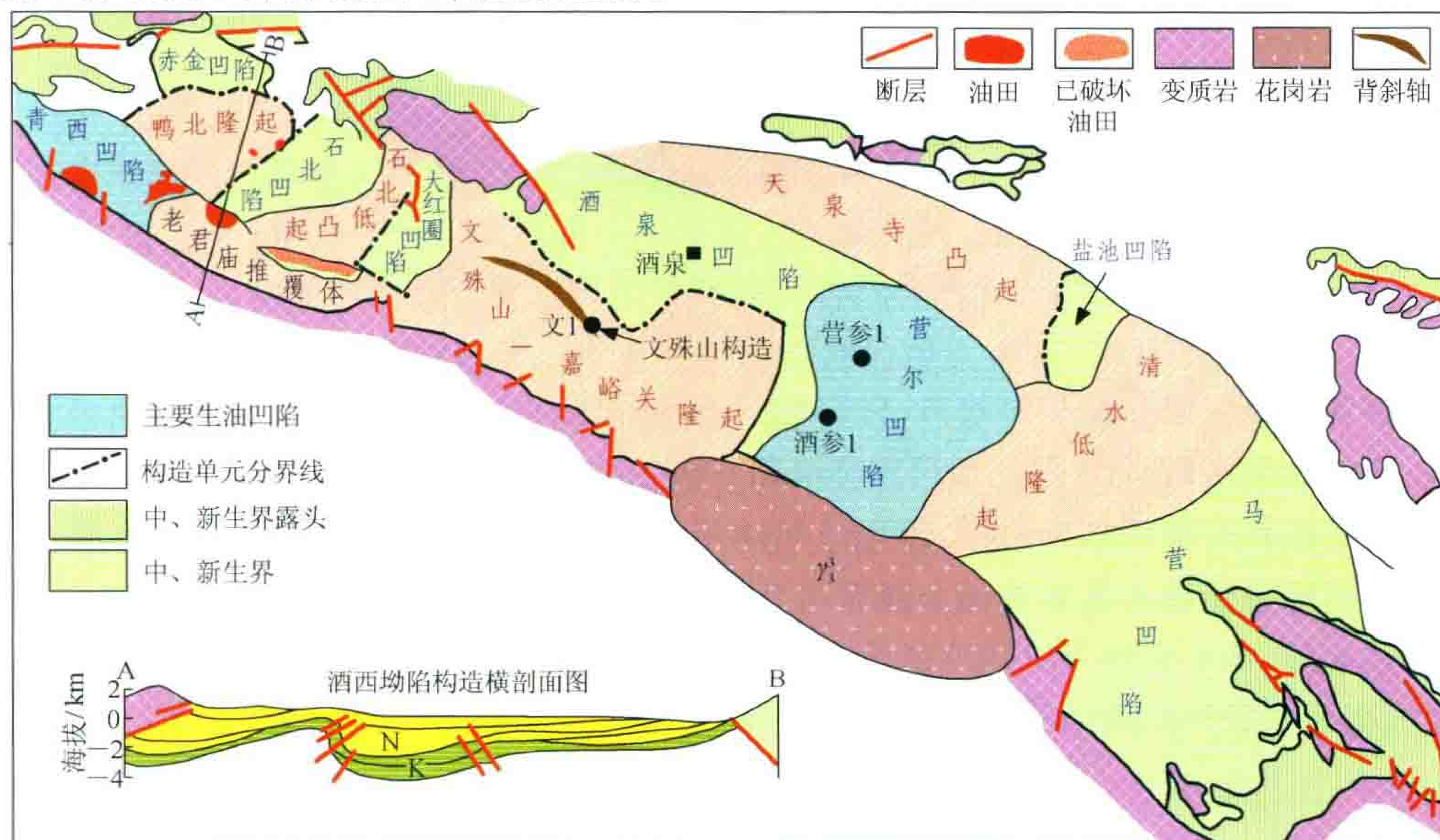


图 4 酒泉盆地构造单元划分图

酒泉盆地位于祁连山北麓，祁连山北麓逆掩大断裂东西绵延千余千米，地质历史上曾发生很多次强烈的地震和火山活动，应当是一个地幔强烈脱气带，地幔脱气迄今并未停止，还有不少圈闭分布于山前沉积盆地中。但迄今只在那些与白垩系油源区（将来可能还有石炭系的）相联系的圈闭中找到了油田，往东的其他盆地，如张掖、民乐和武威盆地等，都无含油迹象。分别于1927年、1932年和1954年发生在河西走廊的古浪大地震（8级）、昌马大地震（7.5级）和山丹大地震（7.25级）都有大量的各种气体喷出，**但未见有油从众多的巨大裂缝中冒出来**。

还有，中国东部著名的北北东向的绵延3000余千米的郯庐大断裂肯定是一条深达地幔的排气通道，也已经发现了与其有成因联系的幔源CH_4、CO_2和He气藏（规模不大）。值得注意的是，只有当这条断裂通过有有机油源岩发育的含油气盆地时，如辽河坳陷、渤海坳陷、济阳坳陷等，断裂附近才会存在油田，而它通过的古老隆起（如山东隆起等）却没有发现油气田，甚至极少见到含油气显示。这个实例说明，即便在地幔流体喷射过程中有费-托催化合成反应发生，产生过一定数量的直链烷烃，也不足以达到成藏的规模。

四、关于基岩油气田

李庆忠和崔永强等坚持无机生油论的一些学者，都把乌克兰第聂伯-顿涅茨盆地西北部边缘变质前寒武系基岩油田作为无机生油论“再次崛起”的典型实例。但是，他们除了说明原油产自盆地边缘隆起的前寒武系变质岩外，并没给出原油的任何幔源证据。如图5所示，第聂伯-顿涅茨盆地是乌克兰最大也是最主要的含油气裂谷盆地，有120多个油田；油气分布具有东南气、西北油的格局。油源层是泥盆系和下石炭统，而气源层是上石炭统的煤系地层。其东北部发现的基岩油田中的原油不仅和盆地内非基岩油田中产出的原油性质相同，而且油源对比证明其石油主要来自下石炭统，油源层埋深也比基岩油藏深500 m以上。

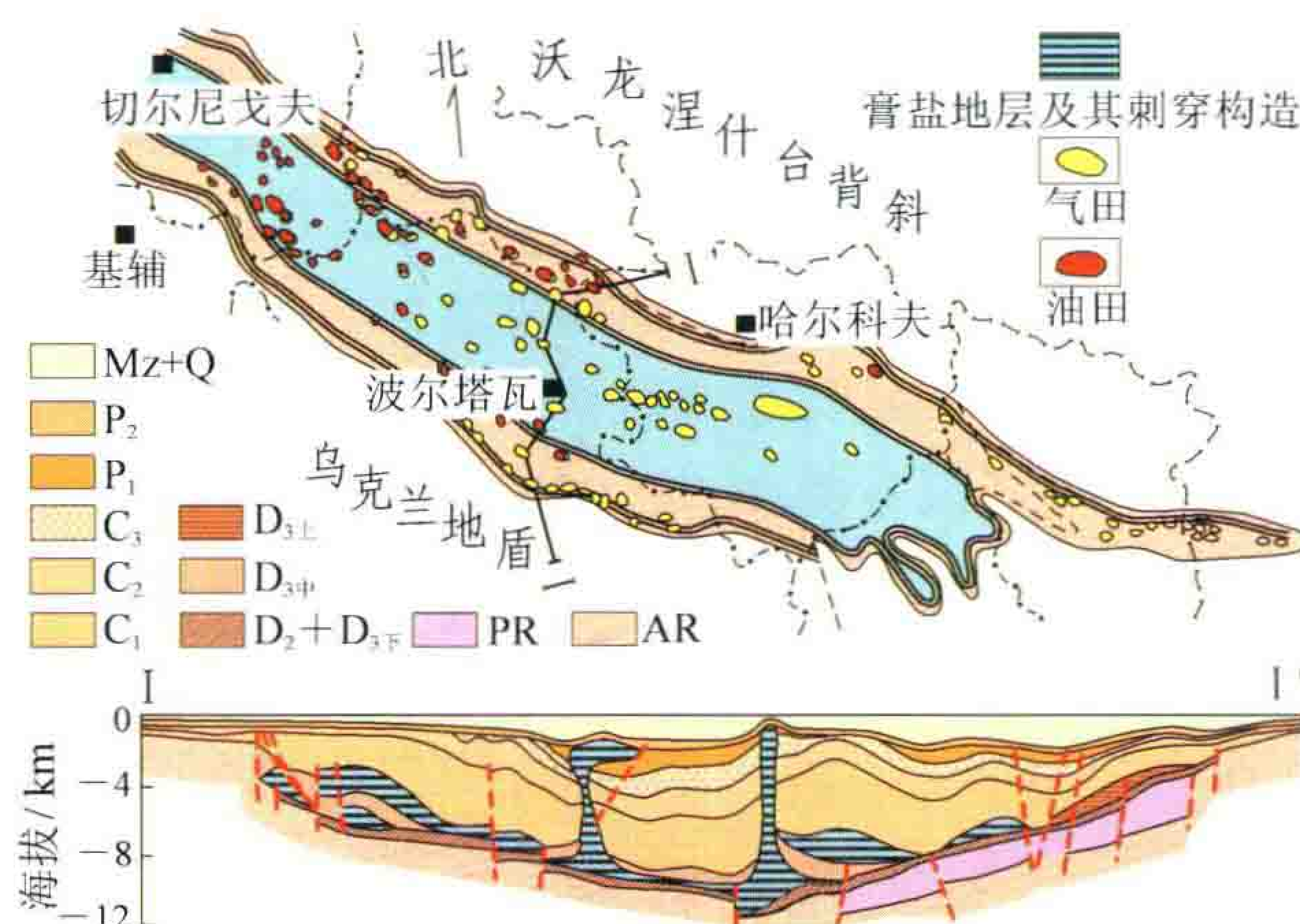


图5 第聂伯-顿涅茨盆地油气田分布和横剖面图

（李国玉提供）

世界上许多含油气区都存在基岩油田，它们无一不是邻近油源区或被烃源层系环绕。玉门鸭儿峡油田西邻青西白垩系油源区（图4），任丘油田东临饶阳古近系生油凹陷，大庆油田的外围和深部也发现了一些与烃源层毗邻或被其环绕的基岩油田，还有辽河坳陷大民屯凹陷等等。迄今在中国还没有发现一个不存在有机油源区而来自幔源的基岩油田，世界都是如此。我国的油气勘探是不会部署在江南古陆、中朝古陆和内蒙地轴上的，倒不是因为这些地区没有圈闭，而是因为没有有机油源区。总之，任何基岩油藏（包括中国）和绝大部分气藏都能找到与其毗邻的有机油气源区，并获得油气源对比的证据。

五、关于鄂尔多斯大型天然气田的成因

崔永强提出："地幔流体向上喷射在浅层形成各种各样的矿产，包括油气、膏盐和岩盐。鄂尔多斯盆地是一个地幔流体成矿集中发育的例子。"确实，如图6所示，鄂尔多斯盆地周缘分布着一个断裂、地堑、挠折发育地带，南有渭河地堑，北有河套地堑，西有六盘山断陷-银川地堑及一个古生界的拗拉槽，东有晋西挠折带，它们应该是地幔流体向上喷射、浅层成矿最有利的场所，然而，迄今在该地带找到的油气田很少。

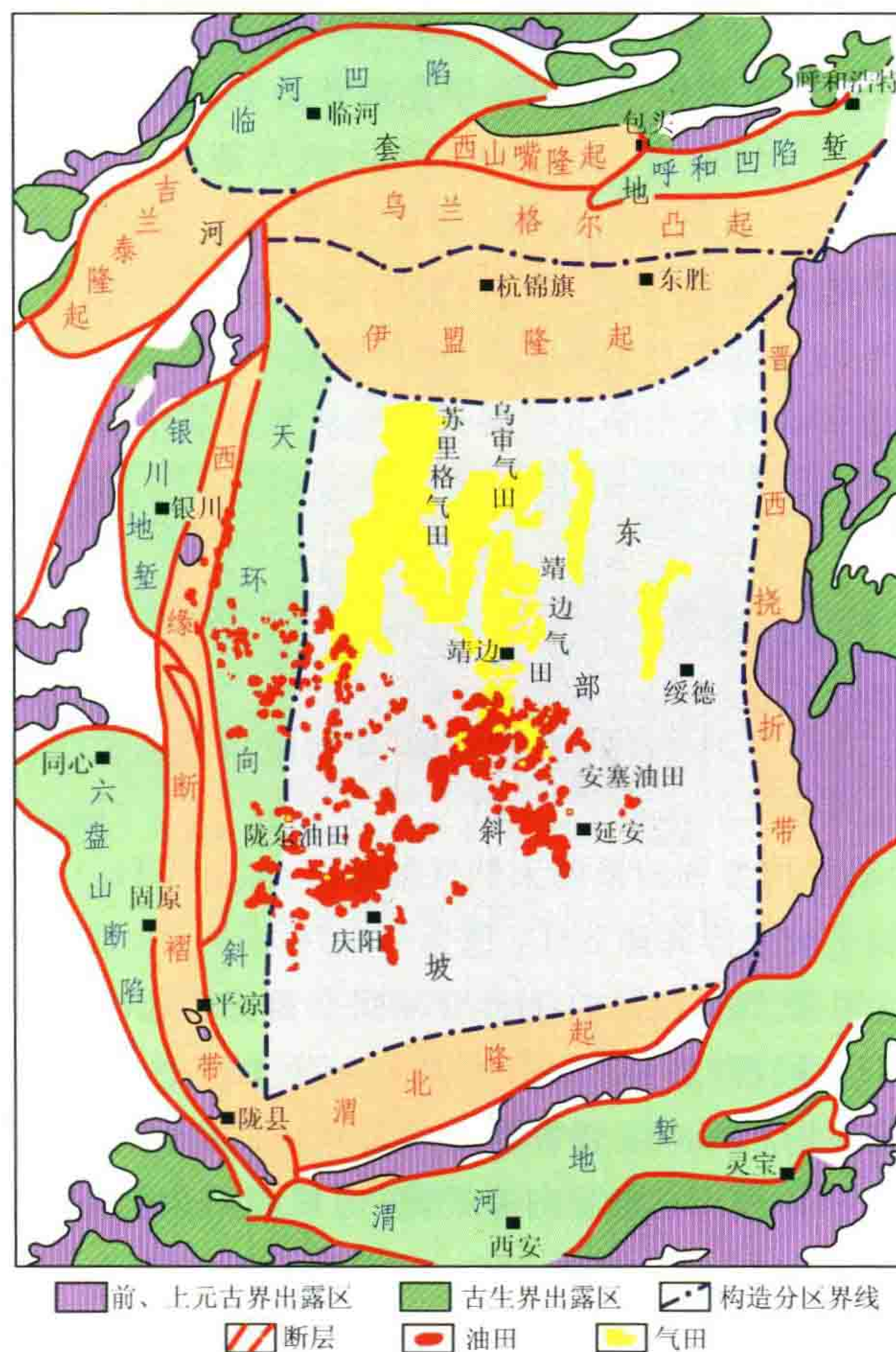


图6　鄂尔多斯盆地构造单元划分及油气田分布图

鄂尔多斯盆地油气田的绝大部分(98%)都分布在盆地中部稳定的台块区，这里在地幔软流层之上的地壳厚达43 km，再加上6000～7000 m厚的中生界和古生界沉积盖层，没有大的基底断裂或板内裂谷，也不存在地幔热底辟体，实在找不出地幔流喷射的脱气通道，何谈成矿？笔者对鄂尔多斯盆地油气作过许多地球化学分析和研究，没有发现幔源特征。从无机生油论者的观点来看，不知是借助于一种什么力量，把绝大部分油气田都从盆地周缘的断裂带推向了盆地中部的广大台块区，也许是"上帝之手"吧。

李庆忠提出："有机说无法解释鄂尔多斯的天然气的形成"，其论点是"天然气的逸散能力极强，几乎一切岩石对天然气都不起封盖作用。我们很难相信陕北的天然气历经70×10^6 a(白垩纪末至今)还能保存到今天"。照这种说法，世界上晚白垩世及其以前即便存在有机成因的天然气聚集成藏，也早已丧失殆尽，现有的天然气田都是源于地幔脱气的无机成因气的晚期成藏的结果。但是，世界上有许多以巨厚膏盐层为盖层的气田，据Halbaity M T在20世纪70年代的统计，39个特大气田中有23个以膏盐层为盖层，占近2/3。北非利比亚的勒梅尔大气田和中国源于侏罗系煤成气的克拉2大气田都是这方面的典型实例。李庆忠在文中提到东西伯利亚在前寒武系找到大量油气(油15×10^8 t，气2×10^{12} m^3)，若非近期无机成因

"应该早就漏光了"。其实不然，正因为东西伯利亚的构造稳定性及寒武系厚达1000～1500 m的膏盐段盖层，才使前寒武系大量油气保存至今。据前苏联全苏石油地质勘探研究所测定，盐岩相邻晶格点距离为2.8×10^{-8} cm，而甲烷和乙烷的分子直径大得多，分别为4.0×10^{-8} cm和4.7×10^{-8} cm。**盐岩的渗透率仅0.214～0.875 mD，**对任何烃类实际都是不渗透的。[24]所以这种可塑性强、致密程度极高、分布广、厚度大的膏盐层必然是可防止油气散失的理想的盖层，导致大气田多与膏盐盖层有关。

就鄂尔多斯大气田而言，其天然气主要源于石炭系-二叠系煤系地层（少部分来源于下奥陶统），气源中心在盆地南部，成烃高峰期在早白垩世末，由于区域构造极为平缓，又是低渗透储集层，因此天然气的扩散、渗流极为缓慢。不能把这一过程想象为"竹筒倒豆子"般一蹴而就，否则我国许多石炭系和侏罗系的煤矿大量煤层瓦斯时而突出成灾就不可理解了。但是毕竟应该看到，由于鄂尔多斯盆地天然气的储盖条件欠佳，相对于500×10^{12} m^3的生气量而言，大量的或者说绝大部分天然气散失了，目前只找到1.5×10^{12} m^3。这是一种面积大而丰度低的气田（0.8×10^8～1.0×10^8 m^3/km^3），具有"广覆式生（供）气，持续运聚成藏特征"[28]。今后的勘探，据估算，总的天然气储量可能不会超过5×10^{12} m^3，也就是说鄂尔多斯盆地石炭系—二叠系生成的煤成气99%都没有聚集起来，或者历经1×10^8 a已经散失了。虽然聚集成藏的可能只是1%，但并没有也不可能彻底散失干净。何况天然气从气源层中释放的过程是极其缓慢的，很可能迄今仍在继续中。

六、关于无机气的成藏问题

天然气运聚和散失的动力学平衡只是问题的一方面，更重要的是天然气性质本身是否具有幔源性质。结合下面无机气的成藏问题作进一步讨论。

大洋中脊、火山与热液活动所检测到的幔源天然气的特征是：① CH_4中富^{13}C重同位素，$\delta^{13}C_1$值大于−2%，最低不小于−2.5%，如东太平洋海隆$\delta^{13}C_1$值为−1.76%～−1.5%；② 烃类气体同位素组成为反序列，即$\delta^{13}C_1>\delta^{13}C_2>\delta^{13}C_3$；③ 氦具有较高的$^3He/^4He$同位素比值（大于$1.0\times10^{-6}$，范围为$1.0\times10^{-6}$～$1.0\times10^{-5}$）；④ 非生物成因（含幔源）$\delta^{13}CCO_2$值大于−0.8%，范围为−0.8%～1.2%。[25,26]

在我国东部太平洋块板俯冲带和郯庐断裂带附近以及广东三水盆地和云南腾冲横断山脉，这种幔源天然气都有所发现，其中CH_4、CO_2和He均可富集成藏，但规模不大。据报道，有：① 东海天外天1井，$\delta^{13}C_1$值大于−1.7%，$\delta^{13}C_2$值为−2.2%（张为纲，1990），$\delta^{13}C_3$值为−2.9%，是反序；② 松辽盆地昌德气藏和肇州西气藏，昌德芳深1井、芳深2井、芳深4井、芳深7井和芳荣地区，$\delta^{13}C_1$值为−2.42%～−1.28%，并具有$\delta^{13}C_1>\delta^{13}C_2>\delta^{13}C_3>\delta^{13}C_4$的反序系列（郭占谦等，1994）；③ 日本列岛4个温泉气，$\delta^{13}C_1$值大于−2%（卜部明子等，1983）；④ 三水盆地水深24井和大港油田港151井也存在幔源甲烷，各约占52.6%和72%，相应幔源氦的$^3He/^4He$值为6.39×10^{-6}和5.0×10^{-6}，$\delta^{13}C_{CO_2}$值分别为−0.57%和0.38%，此外，在苏北黄桥、济阳坳陷也有幔源CO_2和He的发现；[26] ⑤ 统计世界1699个气田，$\delta^{13}C_1$值大于−2.5%有5个，占2.4%。

据研究，鄂尔多斯盆地上古生界天然气的同位素组成的主要值域：$\delta^{13}C_1$为−3.6%～−3.1%，$\delta^{13}C_2$为−2.83%～−2.32%，$\delta^{13}C_3$为−2.81%～−2.34%，$\delta^{13}C_2$与$\delta^{13}C_1$的差值为0.4%～1%，CO_2含量小于3%，$^3He/^4He$值为5.0×10^{-8}～3.7×10^{-8}[27,28]。从以上数据来看，在鄂尔多斯盆地找不到任何有幔源气存在的迹象，相反却与上古生界煤系热解气对比很好。

李庆忠在文章中十分强调地幔脱气作用，其实例包括千岛群岛至堪察加的火山带长600 km的喷气带，加勒比海长达2300 km转换深大断裂带的排气作用，大洋中脊排气带等以及陨石中发现烃类物质等。据李庆忠所言，这些排气带排出的气量非常巨大，估计千岛喷气带自8.3 Ma以来共计喷出甲烷5000×10^8 m^3；加勒比海排气带1 Ma就排出36×10^{12} m^3的气体。这都是毋容置疑的事实。但奇怪，来自地幔的如此大规模的排气作用怎么就没有石油随之排出呢？按照无机生油论者的观点，海面上应该是**气柱冲天、**

油浪滚滚，可从无人见过如此奇观。地球上年年月月都有大大小小的火山喷发和地震，都有大量气体从地壳活动带喷出，可是从来没有人见过火山喷油，或有石油随热液溢出地表，或石油从地震深大断裂伴随气体冒出。可见，无机确实能生气，无机确实不能生油。在实验中能够发生的费一托催化合成反应，在实际地质环境中，在地质历史上基本没有发生过。否则世界的石油资源将是取之不尽，用之不竭了。

问题还在于这些巨大排气带无一例外都处于地壳活动最为剧烈的地带，地幔排出的气基本上散失了而难以聚集成大型气藏。一旦地壳活动减弱，特别是有了沉积盖层之后，也就意味着地幔排气作用基本终结。

举例来说明这一演变过程。松辽盆地南部发现的万金塔 CO_2 气田[29]（图 7）产气层是上白垩统底部的泉头组（K_2q），埋深 800～1400 m，产出气中的 CO_2 含量达 60%～99.5%（深部气层高），CH_4 含量为 0.13%～34.5%，He 含量较高，可达 0.07%～0.08%。其 $^3He/^4He$ 值为 $6.3\sim7.2\times10^{-6}$，$\delta^{13}C_{CO_2}$ 值为 −0.37%～0.88%，平均 −0.52%，据计算，幔源氦的贡献占含氦量的 57.%～65.4%。[26] 但甲烷，其 $\delta^{13}C_1$ 值为 −4%～−4.5%，平均 −4.2%，却排除了来自幔源的可能。这也许是幔源甲烷不多，已经散失了，现在聚集的甲烷来自隆起周围下白垩统气源层的贡献。

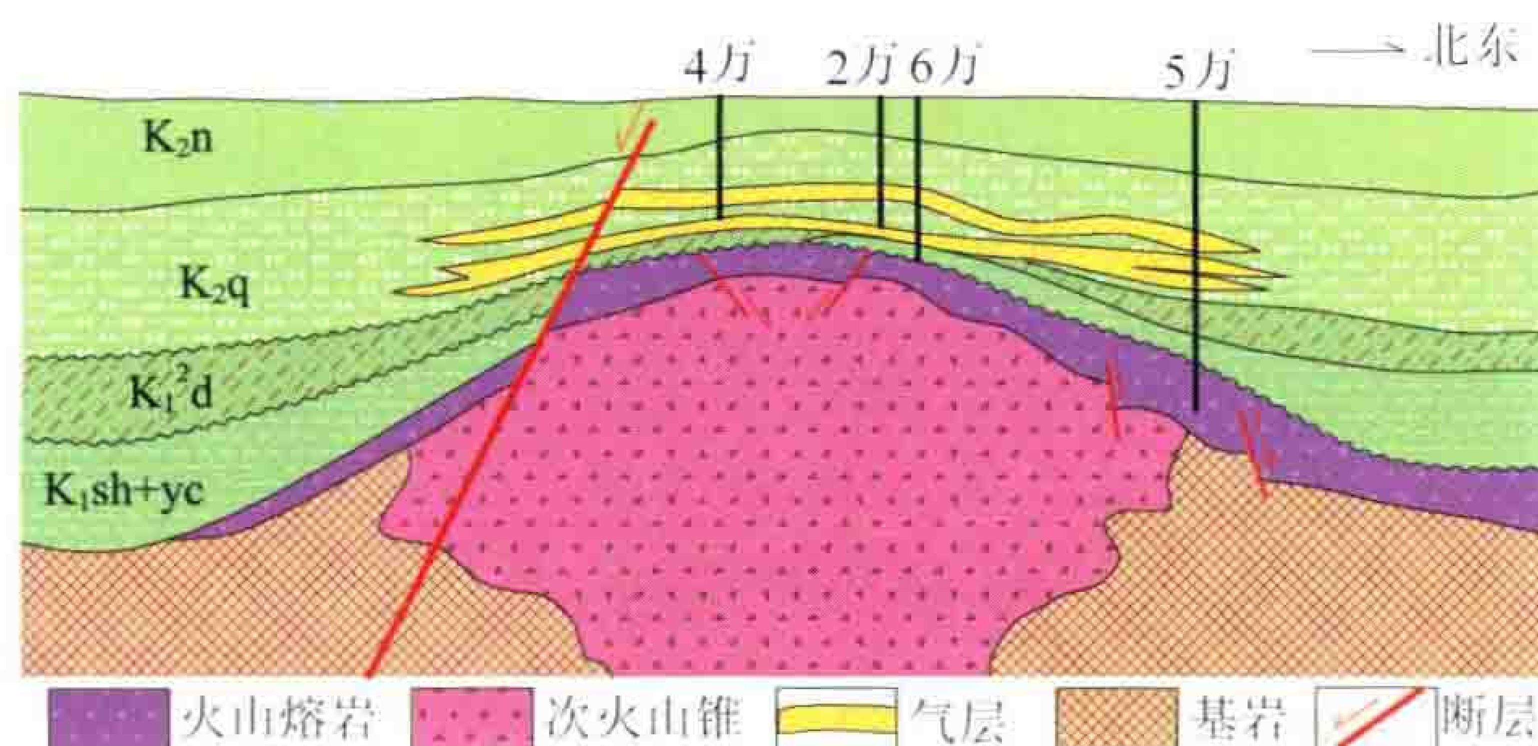


图 7　万金塔气田构造及井位分布图[28]

值得注意的是，万金塔气田构造紧邻郯庐大断裂西侧，坐落在一个侏罗纪古火山口上。可以推断当侏罗纪火山喷发，地幔气体强烈脱出之时，大量的幔源气无以聚集都散失了，只有当这座活火山变成死火山，下白垩统向上超覆沉积又被上白垩统覆盖之时，才有了储集条件，而这时地幔的脱气作用已接近终结了，所以才形成了这个小的幔源 CO_2 和 He 气田。笔者相信，在侏罗纪火山喷发时，哪怕只有 1% 的地幔脱气被聚集并保存至今，都将是一个大气田。

七、关于大庆油田

关于大庆油田，崔永强认为，由于它有源于地幔的深部油气的补充，所以还可以产油 100 a。这种假设是没有科学证据的。对大庆的石油曾做过大量分析，没有发现源于地幔的确切证据。大庆油田的发现是陆相生油理论实践的成功范例，突破了海相生油理论的局限性，曾震惊世界。大庆油田经历 40 余年开采，采出石油超过可采储量 70%，这两三年已经步入开采晚期的产量递减之中了，幔源的补给何在？当然，就整个松辽盆地而言，大庆油田的深部和外围还有相当大的油气资源潜力。大庆油田（含吉林油田）的石油源自上白垩统青山口组和嫩江组这两套主力成熟油源层，近几年在向油田深部和东南外围的扩展勘探中又发现了下白垩统和石炭系-二叠系两套高—过成熟的主力气源层系，估计有上万亿立方米的可探明天然气资源量，近年将探明千亿立方米。由于多套烃源层随埋深增加成熟度不断增加，从成熟直至过成熟，也就造成了油气藏纵向分布的上油下气的格局。当前大庆油田的勘探形势很好，年年有新增石油储量，结晶基底中也有油气藏发现，看来还能开采 30～50 a 倒不是一句空话，甚至本世纪都有油气可采。但值得注意的是新发现的基岩油藏都有邻近的有机油源层存在，没有石油来自幔源的地球化学可信证据。天然气有部分是幔源的，但其量不大。在这里，看看郭占谦的有关文章也许是有益的，他还在努力寻找大庆等油

田有无幔源烃类和金属元素掺混的踪迹[13-15]。

八、关于未成熟石油

李庆忠还提出“低熟油”论是对有机说的否定，认为达不到生烃门限（R_0 值为 0.5%）的商业性未成熟油气本身就否定了干酪根生油说，更不是什么“创新的思路”。

正如陆相生油理论、煤成油理论是对有机生油学说的发展一样，未成熟石油理论也是有机生油学说的重要进展。早在 1978 年 Tissot B P 和 Welte D H 在其专著中阐述干酪根热降解成烃理论时，就提到世界上某些未成熟石油的分布，但他们并没有把未成熟石油纳入干酪根热降解成烃理论体系之中。我国从 1982 年开始注意到未成熟石油在陆相含油气盆地中的分布及其资源潜力，2003 年笔者发表了关于未成熟石油成因机制的专著[30]，因此在这里不想多加讨论了。但应该指出的是，**未成熟石油并非源于干酪根，而是未成熟烃源岩中的可溶有机质生成的，**因为在未成熟烃源岩的有机质中，有 70%～80%以非共价键的缔合形式存在，杂元素含量高而活化能很低，在较低温度下，在生化作用以及在有催化剂参与的物理化学作用下生成了未成熟石油，这已为油源对比所证实。咸水还原环境中的沉积有机质中可溶部分含量高，利于形成未成熟石油。

结语

有机生油学说经过近 30 年的发展，已不再是一种假说，而是在油气勘探中发挥着日益重要作用的科学的石油地质理论体系，并必将在今后石油勘探实践中得到进一步完善和发展。对有机生油论的选择，是油气勘探家从数十年的勘探实践中作出的正确决策。任何油气勘探部门都不会把自己的勘探力量投入到那些过去和现在断裂、地震和火山活动频繁，因而地幔脱气作用最为强烈的地带去的，而只会投入到那些有机质富集、油源丰富的稳定的沉积盆地之中，因为油气源是一切油气藏形成的物质基础。对于无机生油论者，不应再停留在地质学的假设和推论上，而应尽力找出油田具有幔源成因的直接的科学证据，哪怕只找出一个油田实例，也是令人欣慰的。因为一种油气成因科学理论的创立，应该至少获得其产物的可靠科学的证据。

参考文献

[1] POMAHOBЮ A，ФОМЧВ H. 石油成因的无机说和有机说[J]. 新疆石油地质编辑部，任俞，译. 新疆石油地质，2004，25(5)：571-573.

[2] 库德梁采夫 H A. 反对石油有机起源假说[M]. 北京地质勘探学院石油教研室，译. 北京：科学出版社，1958.

[3] 蒂索 B P，威尔特 D H. 石油形成和分布—油气勘探新途径[M]. 2 版. 徐永元，徐濂，郝石生，等，译. 北京：石油工业出版社，1982.

[4] СОКОЛОВ Б А，МЕЛВНИКОВ Ф П. Углеводородная сфера земли[J]. Докл. АНСССР，1981，261(2)：471-474.

[5] 熊和生. 石油天然气有第三种成因吗？（介绍昆明石油局规划设计所李汉韬的原始大气油气成因说）[N]. 科学时报，2002-03-18(3).

[6] ROBINSON T. The Origins of Petroleum[J]. Nature，1966，212(5068)：1291-1295.

[7] GOLD T. 对地壳甲烷和其他烃类非生物成因理论的贡献[C]//第二十七届国际地质会议石油地质论文集. 北京：石油工业出版社，1985. 232-241.

[8] КРОПОТКИН П Н, ВАЛЯЕВ Б М. 地球脱气作用的构造控制和烃类成因[C]//第二十七届国际地质会议石油地质论文集. 北京:石油工业出版社，1985. 242-247.
[9] 沃里沃夫斯基 B C. 世界最大含油气盆地[M]. 任俞,译. 北京：石油工业出版社,1991.
[10] ROBINSON R. Duplex origin of petroleum[J]. Nature，1963，199：113-114.
[11] SZATMARI P. Petroleum formation by Fischer-Tropsch synthesis in plate tectonics[J]. AAPG Bull，1989,73(8)：989-998.
[12] 张景廉. 论石油的无机成因[M]. 北京:石油工业出版社，2001.
[13] 郭占谦. 成矿热液与石油生成[J]. 新疆石油地质,2001，22(3):181-184.
[14] 郭占谦. 火山活动与油气资源[J]. 新疆石油地质,2003，24(2):176-179.
[15] 郭占谦. 关于中国油气资源可持续发展的思考(二)[J]. 新疆石油地质，2003，24(5)：464-469.
[16] 王先彬. 非生物成因天然气理论的宇宙化学依据[J]. 天然气地球科学，1990，1(1)：4-8.
[17] 符晓. 探索无机成因油气藏的地质条件兼论四川盆地西部找油方向[J]. 石油实验地质，1987，9(3)：211-217.
[18] 张恺. 新疆含油气亚区非生物成因天然气远景地质储量估算及寻找大油气田方向的探讨[J]. 石油勘探与开发,1990,17(1):14-21.
[19] 张恺. 论地球演化的板块构造阶段与油气起源的演化及其全球分布、富集规律(Ⅰ)[J]. 石油勘探与开发,1990,17(5):1-7.
[20] 张恺. 论地球演化的板块构造阶段与油气起源的演化及其全球分布、富集规律(Ⅱ)[J]. 石油勘探与开发,1991,18(1):1-6.
[21] 栾作峰. 石油无机成因初步探讨[J]. 海洋科学,1978,9(4)：5-10.
[22] 杜乐天. 地球的五个气圈的氢烃资源[J]. 铀矿地质,1993,9 (5)：257-264.
[23] 李庆忠. 打破思想禁锢,重新审视生油理论[J]. 新疆石油地质，2003，24(1):75-83.
[24] ЧАЛКОВ М А. 关于盐沉积时期的中间盆地和油气田与含盐层系的共生关系[J]. 国外油田地质勘探与开发，1972，6：1-21.
[25] 刘文汇，孙明良,徐永昌. 鄂尔多斯盆地天然气稀有气体同位素特征及气源示踪[C]//天然气地质地球化学文集. 北京:地质出版社,2002. 335-340.
[26] 徐永昌,沈平,刘文汇,等. 东部油气区天然气中幔源挥发分的地球化学[C]//天然气地球化学文集. 北京:地质出版社,2002. 304-309.
[27] 黄第藩,熊传武,杨俊杰,等. 鄂尔多斯盆地中部大气田的气源判识[J]. 科学通报，1996,41(17)：1588-1592.
[28] 杨华,张文正,李剑峰,等. 鄂尔多斯盆地北部上古生界天然气的地球化学研究[J]. 沉积学报，2004，22(S1):39-44.
[29] 裘松余. 松辽盆地南部万金塔二氧化碳气田的地质特征及其成因[J]. 石油与天然气地质，1985,6(4)：434-439.
[30] 黄第藩,张大江,王培荣,等. 中国未成熟石油成因机由和成藏条件[M]. 北京:石油工业出版社，2003.

文章编号 303-3

生油理论值得重新审视

——答黄第藩、梁狄刚《关于油气勘探中石油生成的理论基础问题》一文

这是我答复他们的文章。有机与无机生油理论的争论已经经历了几十年，目前还没有定论。我申明：有机生油指标只是泥岩盖层的指标和相当于油苗的指标。实验室里至今无法证实在低温条件下，可以生成 C_{10} 以上的石油，哪怕一个 ppm。

对我前一篇文章提出的 22 个问题他们都还没有全面答复。我在这第二篇文章里，又提出 16 个方面问题请他们考虑。

此文还提出近年来我们在大庆的深层又发现扶杨油层大片含油，胜利油田的埕岛地区馆陶组覆盖下的花岗岩里采出很多油，一系列事实说明在当前的油田之下，深层还有油气存在。如果打破了有机生油理论的束缚，我们就可能发现油气是来自地壳深处。

此文刊发表于《石油勘探与开发》2006 年第 1 期，作者李庆忠。

摘　要

针对黄第藩、梁狄刚二位对无机生油论的商榷文章，简要地重新申述了作者的立场。认为虽然在大多数情况下，有机生油论的各种指标客观上的确能够指导找油的实践，但目前的生油理论的实质可能只是一种盖层指标以及与间接油苗相类似的找油指标。直到今天，谁也没有在实验室里证明低温(50℃～100℃)条件下有机物可以生成石油；认为如果今后石油无机生成学说得到普遍接受，那么虽然将仍旧主要在沉积岩中找油，不过由于打破了思想束缚，就会勇于去开拓新区、新层系的勘探工作，并且也会注意去寻找与深断裂有关的油气藏。近年来随着中国各盆地的勘探深度逐渐加大，在目前开发的油气田的范围内，只要向深部打井，在深层还可以找到油气。如果思想禁锢在有机生油论的框框里，就会贻误油气田的发现。

关键词

生油理论　陆相生油　盖层指标　深井钻探　深大断裂　成熟度　干酪根

《石油勘探与开发》2005 年第 5 期刊登了黄第藩、梁狄刚二位对无机生油论的反驳文章《关于油气勘探中石油生成的理论基础问题——与无机生油论者商榷》[1]（下简称商榷文章）。文中有多处是点名与我辩论的，因此我有必要简要地申述我的立场。

我在 2003 年发表《打破思想禁锢，重新审视生油理论》[2]（下简称我的文章）的时候，目的就是想引起学术争论，现在黄、梁二位开始参与学术争论，我认为这是一件好事。通过学术争论，今后在石油勘探决策中，我们肯定会考虑得更全面一点。我是一个以地球物理为专业的人，本来没有资格向当代石油地质的重大课题“生油理论”来挑战。有人劝我说：“你多管闲事干什么？”此外，我自知我的文章将得罪不少人，其中还包括我的不少好友。但是，为了石油勘探事业的发展，为了追求正确的答案，我还是毅然地投稿发表了，对此后有机生油论者将对我的指摘，我是有心理准备的。

下面就黄、梁二位对我的文章商榷之点简要表态。

(1) 我并没有否认在大多数情况下现有的有机生油理论在勘探实践中起着指导作用。请大家再仔细读一读我的文章,文中我强调的是这些所谓"生油指标",**它并没有解答石油是如何生成的**。我认为所谓"生油指标",实质上只是起了类似于"间接油苗"与"盖层好坏"两方面的作用,因为实验室里无法证明在低温的条件下有机物质可以转化为 C_{10} 以上的石油组分。因此,有机生油理论到目前还只是一种学说。

我承认"目前在大多数情况下生油指标在找油方面有指导作用",这与我怀疑"有机生油理论本身的正确性"并不"自相矛盾"。

(2) 商榷文章称现代有机生油理论已经是**"相当完整的科学理论体系"**,它已经"在分子级水平上查明了石油及沉积有机物质的组成和分布特征,建立了具有普遍意义的沉积有机质热演化成烃模式,……取得了石油与烃源岩之间有着可靠的成因联系的证据"。

如果照你们这样说,有机生油理论已经不容再怀疑了,谁要再怀疑,谁就是反对科学理论体系。那么请问,世界范围内关于有机与无机生油理论的论战为什么始终没有停止过?

我承认现代地球化学实验室已经装备了不少先进的仪器,它们可以用来研究石油的分子级组成,例如往往能够通过油源分析,说出石油是从哪个地层中产生出来的。但是,我的文章第 16 节已经指出:我们目前生油理论的所谓**"油源分析"**,实际只是说明原油在运移道路上流经了什么地层,夹带着哪个地层的有机物质而已。石油是一种极好的溶剂,它在垂直运移的道路上,(深部地层中垂直裂隙是十分发育的)在沿着断层和裂隙缓慢而长期的运移过程中,完全可以融合、夹带地层中的有机物质。这些化学成分到底是石油生成过程中固有的,还是后来原油在运移道路上夹带、溶解而来的,**这个问题不搞清楚,即使用了分子级水平的科学手段,也帮不了有机生油理论的忙。**

(3) 我对现代有机生油理论的怀疑在我的文章中罗列了 22 条。黄、梁二位为何不从这 22 条出发,全面地加以反驳呢?请你们把我的文章仔细读一读,看看哪些观点有合理的地方,再全面地加以评论。此外,现在主张无机生油的文章已经不少,难免有的主张不一定对。找到对方个别论点的短处加以批判,攻其一点,不及其余,这恐怕是并不能以理服人的。

(4) 商榷文章所提出的为什么世界著名的大型地幔脱气带上只喷天然气而没有见到喷石油的,这个问题提得好,值得我们进一步思考。在结语中又建议无机生油论者找出油田具有幔源成因的科学证据,这个建议也提得好。我认为无机生油理论也还存在不少疑问。客观地说:两种理论目前都还处于"假说"的阶段。要真正找到正确的答案,还需要通过今后较长一个时期的深入研究。

下面对商榷文章中的几个具体论据再说一点意见。

(5) 商榷文章承认:"到目前为止,石油在低温条件下不能生成。"但又说大庆长垣油源层的"现今门限温度是 60℃,如果换算为白垩纪末(距今 6500×10^4 a)的古门限温度应在 140℃左右",这是如何换算的?是否又使用了"时间可以代替温度"的老概念?用的是什么换算公式?大庆长垣油源层的古地温是否达到过这个门限温度?

此外,我的文章中列举的俄罗斯的恩巴油区的地温才 40℃,这个稳定地台区过去也不曾深埋过,石油又是如何生成的呢?你们又为什么避而不谈了?

(6) 商榷文章中引用的巴黎盆地的热解数据也仅仅是从 180℃开始的,而且表中没有说明烃类、胶质和沥青质各占多少,也没有说明表中的烃类是否以沼气为主,C_{10} 以上的石油组分占多少。

我并没有要求按地质年代的千万年时间来做实验,但是我认为以现代的科学技术手段,一两年时间总是可以得出某些结论的。为什么至今实验室里还无法证明在低温条件下有机物质可以转化为 C_{10} 以上的石油组分呢?哪怕产生质量分数为 10^{-6} 的也算是个证明呀。

(7) 商榷文章的图 3 是哈西迈萨乌德油田的地质横剖面。此图没有按实际比例绘(估计横坐标经过强烈压缩了),图上哈西迈萨乌德到古尔德巴盖勒之间的实际距离应为 100 多千米(见石油工业出版社 1982 年出版的《世界含油气盆地图集》,第 24 页),即商榷文章所谓的"志留系油源层就存在于油田翼部"

的说法实际横向距离在 50 km 左右，我的文章并没有说错吧？请你们再核实一下。你们所谓"翼部"，其倾角恐怕连 1°都不到，如何作 50 km 的长距离运移？

（8）关于我提到过油层附近的红色层生油指标也是很高的，我解释如下：1960 年我在新疆工作，据乌鲁木齐科研所测定的地化指标，克乌油田的上三叠统克拉玛依组的生油指标很高。克拉玛依组下部 K1 层为棕红色砂质泥岩与灰绿色、棕红色砂岩互层，夹砾岩透镜体；上部 K2 层为灰色、灰绿色粗砂岩及细砾岩，夹薄层砂质泥岩。当时科研所的报告说：克拉玛依组生油指标很高，是最好的生油层（这在新疆局有案可查）。我的文章说这些话时，只是想进一步说明，有机碳和氯仿沥青 A 实际上是起到了"间接油苗"作用的。

（9）商榷文章中关于低熟油的分析一节并没有驳倒我的文章中"一切成熟度 R_0 都能生油，R_0 指标就与是否生油无关了"的论点。

（10）尽管在大多数情况下现有的有机生油理论在勘探实践中能起到指导作用，但是由于受有机生油理论方面的思想禁锢，已经妨碍着目前的找油实践，这样的例子已经不少了。流花 11-1 油田是中国南海最大的油田，当初 Amoco 公司打流花 11-1-A 井的时候，中方的地质家因为受有机生油理论的局限，认为那里没有油源而反对打井。有人说：**"Amoco 公司是不是没有地质家了？"**有人还说：**"如果这里找到油气，我倒着走！"**[3]。这便是一部分人受有机生油理论影响而差一点儿丢掉找到一个大油田的机会的极端例子。

我在我的文章里还列举了和田河气田玛 4 井、山 1 井的勘探历程，实际上也体现了现有生油理论的负面影响。我十分敬佩勇敢地打流花 11-1-A 井、玛 4 井、山 1 井、依南 2 井的一批勇敢分子。

我们搞新区勘探时，尤其不能死板地事先认定哪一个地层是油源层。如果必须先明确油源层才能打探井，那么就可能不会发现塔西南的柯克亚高产油田。事实上，不少探井油层打喷了也还不知道是哪里生的油，这样的例子已经不少了。

当然，我并不是主张无根据地乱打探井。我的主张在我的文章里完整地表达为："找油的关键是：第一要有区域性好盖层，盐岩层最好，局部好的泥岩盖层也行；第二要有储集层，及圈闭条件；第三，附近有深断裂，或者断到基底的断层。在这 3 条的基础上就可评价后择优打探井（暂时不要去管生油的成因）。这样我们的找油思路就会更宽广一些。"

（11）石油的有机说和无机说目前都还只是一种学说，揭破这个谜团需要很长久的时间。既然这样，为什么我们不能从多方面思考问题呢？我在我的文章里提出：至少对生油理论不要"一元论"。为什么你们连人家作"二元论"的想法都不能容忍呢？

我主张的找油方针没有错，"只要有良好的盖层条件，而且有圈闭条件，就值得进一步勘探"。我的这个提法并没有甩掉所谓"生油指标"，因为只要有良好的盖层条件，"生油指标"是肯定满足的。因为目前所谓的生油指标本身，便是"盖层指标"加上"间接油苗"的两层意思（但我不认为它真正是"生油"的指标）。

此外在我的文章中，我认为应特别重视中国西部区域性大断裂在控制油气方面的作用。例如，**塔里木盆地从色力布亚到和田河，全长 300 km 的玛扎塔克断裂带显然是十分重要的勘探对象**，尽管它是喜马拉雅运动末期才迟迟形成的构造，生油来源也还不明确。*

（12）片面强调有机生油理论的作用，人们往往不恰当地夸大巨厚暗色泥岩的生油作用，在中国勘探实践中也有几个起到负面作用的例子。

20 世纪 60 年代初，胜利油田在东营凹陷相继发现胜利村-坨庄、东营-辛镇等一批油田后，为扩大战果，向东营凹陷南部博兴地区打探井，发现有着一个很好的生油凹陷。通 2 井见到沙河街组暗色泥岩厚达 1300 多米，油气显示很好，泥岩的裂缝中都装满油，但是由于储集层物性差，只具有低产油流。紧接着在其西面 10 km 高青地区钻井中发现沙河街组有厚达 800 m 的大套好砂岩。于是认为高青砂岩体紧靠生油

* 和田河气田发现后，据气源分析说是来自寒武系—奥陶系。其实，塔西南的寒武系—奥陶系早已"过成熟"了。再说即使它还能生气，那么在短短的喜马拉雅末期至今，又是如何从已压实而极致密的塔西南的寒武系—奥陶系里长距离运移到和田河气田中来的呢？

凹陷，想必大有来头，大家想在附近找出一个“科威特大油田”来（这个口号当时很响亮）。（注：科威特布尔干油田有巨厚的含油砂层，中白垩统布尔干组产油砂层厚 350 m，构造面积 700 km^2，可采储量达 99×10^8 t。）于是一再在这个地区打井，但经过将近 10 年的钻探，始终没有找到“科威特大油田”，只有一批小型油田，有厚砂层的地方钻探结果基本是含水层。后来才悟出其中道理，这附近没有像样的构造圈闭。这便是片面追求巨厚生油层而不分析构造圈闭条件导致失败的例子。

20 世纪 90 年代，在柴达木盆地北缘冷湖地区打了一口基准井（冷科 1 井），在侏罗系中发现有很厚的“生油层”，于是三次油气资源评价资源量马上高涨为 12 亿 t。我们且不说所谓油气资源评价的可靠性到底有多大，但是只看暗色泥岩巨厚，不分析这些泥岩与储集层的搭配，以及具体的构造圈闭条件，这个偏向目前还是有的，我认为这是应当在今后加以改正的。

（13）我在我的文章中认为：**石油及天然气是极容易流动的，极容易逸散的，所有的油气田历来都处于不断漏失、不断补充、不断调整的动态平衡的过程中。而现在的有机生油理论，往往与这种事实格格不入。他们认为所有的石油都只能存在于“生油灶”周围不远处，也即“源控论”的说法。**

请大家思考，为什么新构造运动对油气聚集起到那样大的作用？

试问为什么今构造对找油有决定性作用？（地震勘探为什么对石油勘探有那么样的重要作用？）

为什么即使含油气构造历经多次的构造运动，然而我们找到的油气田绝大多数都是装满到圈闭的溢出点的？

为什么油田上方的“烟囱现象”和地球化学特征（晕）普遍被大家承认？（尽管我认为用它找油是不容易的，因为地球化学背景场很混乱。）

这一切告诉我们，自古以来，在整个地质历史时期里，油气的逸散规模是很大的。世界上有些已经破坏了的古油藏规模很大。例如加拿大阿塔巴斯克河的石油沥青矿，按最保守的计算要有 $120\times10^8\sim350\times10^8$ t 总储量，但该矿区的沉积总厚度最大的地方也没有超过 1000 m。这用有机生油理论是很难解释通的。

（14）近年来随着中国各盆地的勘探深度逐渐加大，我们已经看到，**凡是目前开发的油气田的范围内，只要向深部打井，几乎没有例外地在深层还可以找到油气（只是量的多少而已）。这可能进一步说明油气是从地壳中生成的，而且是通过断层、裂隙上升到各个圈闭之中的。**

例如近年来在大庆长垣当今开发的油田之下，已经发现长垣南部扶杨油层大面积含油，有着很大的规模。杏树岗到葡萄花一带原油产量还不低，而且奇怪的是目前直到井底尚未见底水。

胜利油田埕岛地区最近多口探井在馆陶组油层之下的深处花岗岩里打出高产油流。埕北 303 井于 3570 m从中生界进入下寒武统，3590 m 进入太古宇花岗岩，井底 3950 m 仍在花岗岩中，在 3598.2～3950.0 m井段太古宇中试油，日产油 184 t（为轻质凝析油，相对密度 0.77），气 33890 m^3，不产水。边上埕北 302 井钻进太古宇花岗岩后直至 4363 m 完钻，在花岗岩中试油，产油 100 多立方米，出轻质油，也没有见底水。此处上部地层作单斜北倾，沙河街组“油源层”在北坡基本已超覆尖灭，花岗岩与“烃源岩”根本碰不见面，潜山南部深凹陷里古近系又是向南抬起的，油气运移方向也不会指向此潜山，所以，哪里来的油？

塔里木盆地塔中低隆起参数 1 井于 7164 m 钻至太古宇花岗闪长岩，也曾见到油气显示。

最近报道中国石化集团正在塔河油田现有潜山油田奥陶系储集层之下进一步探深层油田，设计了一口 8000 m 深的亚洲第一超深井。我认为这口井会有很大的希望在油田之下找到新的含油层。

克拉玛依油田深部直到变质岩里都有油气显示。玉门油田向下直到志留系都是含油的。柴达木盆地的狮子沟构造狮深 1 井（深 4136 m）、南翼山构造南 2 井、跃进 1 号构造跃深 1 井（深 3251 m）等探井都说明，现今油田的下面还不断有着油气的某种程度的聚集。

（15）在我的文章第 17 节中我明确地表明：今后如果石油无机生成学说得到普遍接受，那么，人们将仍旧主要在沉积岩中找油，**不过由于打破了思想上的束缚，人们会注意去寻找与深断裂有关的油气藏。**我不赞成直接到大片基底里去找石油，因为那里孔隙度很小，石油还没有富集起来，还可能缺少有效的盖层

封堵条件。但是在沉积盖层良好的地方,潜山油气田仍然是我们可以下手的好地方。例如,我一直在呼吁的、大有希望的青海油南构造(英雄岭)的花岗岩基底里,可能存在着一个相当大的油气田,我建议加强地震攻关,查明高点位置后上钻。

(16) 总之,在以有机生油为主调的今天,对出现无机生油论或二元论的论调,大家不必大惊小怪,更不要对无机生油论全盘加以否定,大家心平气和地开展学术讨论不好吗?

在科学发展的历史上,经常有人们以为是千真万确的知识后来被认为是错误的。例如"天圆地方""太阳绕着地球转"是人们直觉的"真理",统治了上千年的人类认知过程。关于热与火的本质,中国在很久以前都以为火是一种元素,与金、木、水、土组成了万千世界,在希腊古老文化中也是如此。后来提出"燃烧素"的概念,用它解释为什么东西会燃烧,会发热。这种思想又统治了几个世纪,直到后来拉瓦锡证实了燃烧是一种氧化反应。又直到分子动力学兴起,才搞清楚温度和热是分子运动的速度加快所造成,并没有"火"这种元素。

生命的起因直到今天还不清楚。因而关于油气的生成理论存在不同的学说也在所难免,我们不能认为有机生油理论已经不容争辩了。

生油的学说可以从长计议,但是找油时不要一元论(有机说),至少应该作两种设想,即我们今后一方面仍旧可以使用现有的"有机生油指标",但是不迷信它。**不要先入为主地只在"油源层"附近打井,记住油源可能从深部而来**。积极甩开钻探,开辟新区、新层系的找油工作,这才是出路。

这样可能要比坚持僵化了的有机生油论要好得多。

参考文献

[1] 黄第藩,梁狄刚. 关于油气勘探中石油生成的理论基础问题——与无机生油论者商榷[J]. 石油勘探与开发,2005,32(5):1-10.

[2] 李庆忠. 打破思想禁锢,重新审视生油理论[J]. 新疆石油地质,2003,24(1):75-83.

[3] 邱中建,龚再生. 中国油气勘探[M]. 北京:石油工业出版社,1999.

文章编号 303-4



再论生油理论



作者在本文集付印之前，将近年来我搜集的有关于油气生成理论的材料，整理成这篇文章，进一步指出目前的有机生油理论还存在不少问题。

本文补充了近年来新发现的资料，又引用了李明诚、龚再生、孙龙德等的文献内容，归纳出作者自己的判断。

提出今后找油至少应该用“二元论”的生油理论作指导，并指出了 4 个找油方向。

一、桩海-埕北花岗岩油藏是从哪里来的油？

胜利油田桩海-埕北地区的太古界花岗片麻岩中普遍含油(图 1-1 中红色井柱)，试油得高产，并且不含水！它们与下第三系沙河街组生油层根本没有接触，油源从何而来？值得深思。

图 1 左边 CB302 井井底深达 4364.95 m，钻遇太古界花岗片麻岩厚度有 235.55 m 井段。经试油 10 mm油嘴，日产油 131 t，气 14817 m^3，试油不产水。

图 1 中花岗岩出油(红色柱子)的埋藏深度从 1800 m 到 4300 m 还不止，总厚度超过 2500 m。看来都是含油的。

奇怪的是这 5 口井直到井底钻到的深度处还没有见底水；图中 Art 红色柱子下方的弯曲黑线是假想的花岗岩风化层底界，它是上报储量需要的。但我认为风化层并没有那样厚，这里应该主要是花岗岩在裂缝中储油。所有的裂缝都已经装满油，所以打井时没有遇到大裂缝，产量就低；遇到大裂缝，产量就高。

本区很奇怪的是花岗岩与沙河街组所谓的烃源岩根本没有接触的机会(图 1 中深蓝色地层是沙河街地层)。花岗岩上面覆盖的是 1～2 km 厚的中生界及古生界地层。古生界也含油并产油。中生界个别井出油。

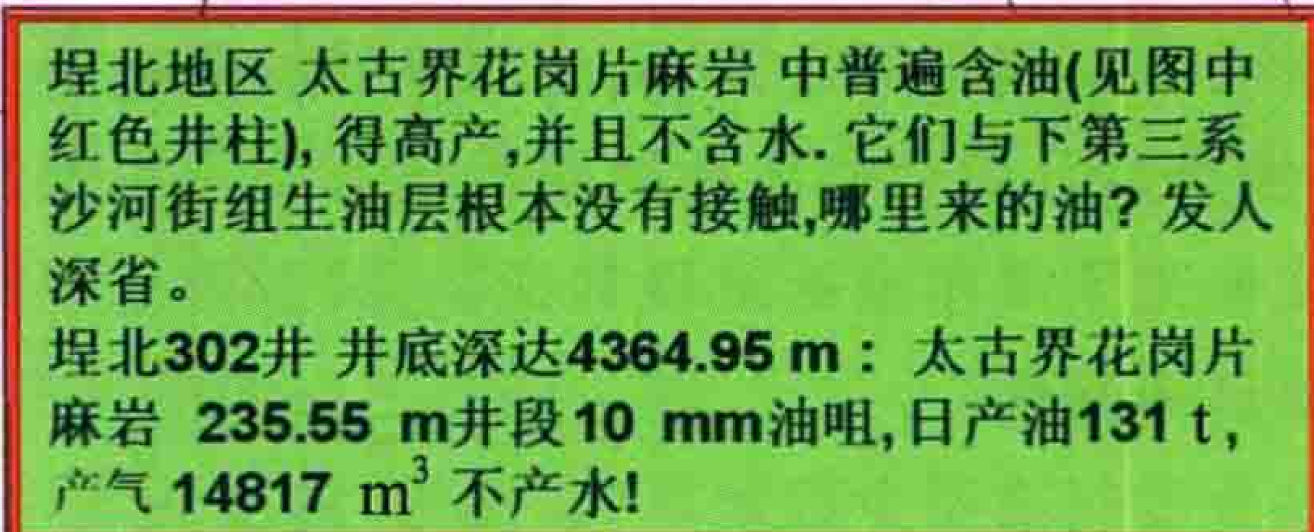


图1 CB302-CB301井南北向油藏剖面

图2是CB302-CB301井南北向油藏剖面里的6口井的试油情况。最南面的HZ10井位置在图外,其4300 m井段的下古生界出油,该井没有打到花岗岩。

该图可以看到,太古界花岗岩根本没有与所谓的"沙河街生油岩"接触,中间隔着很厚的中生界红层。

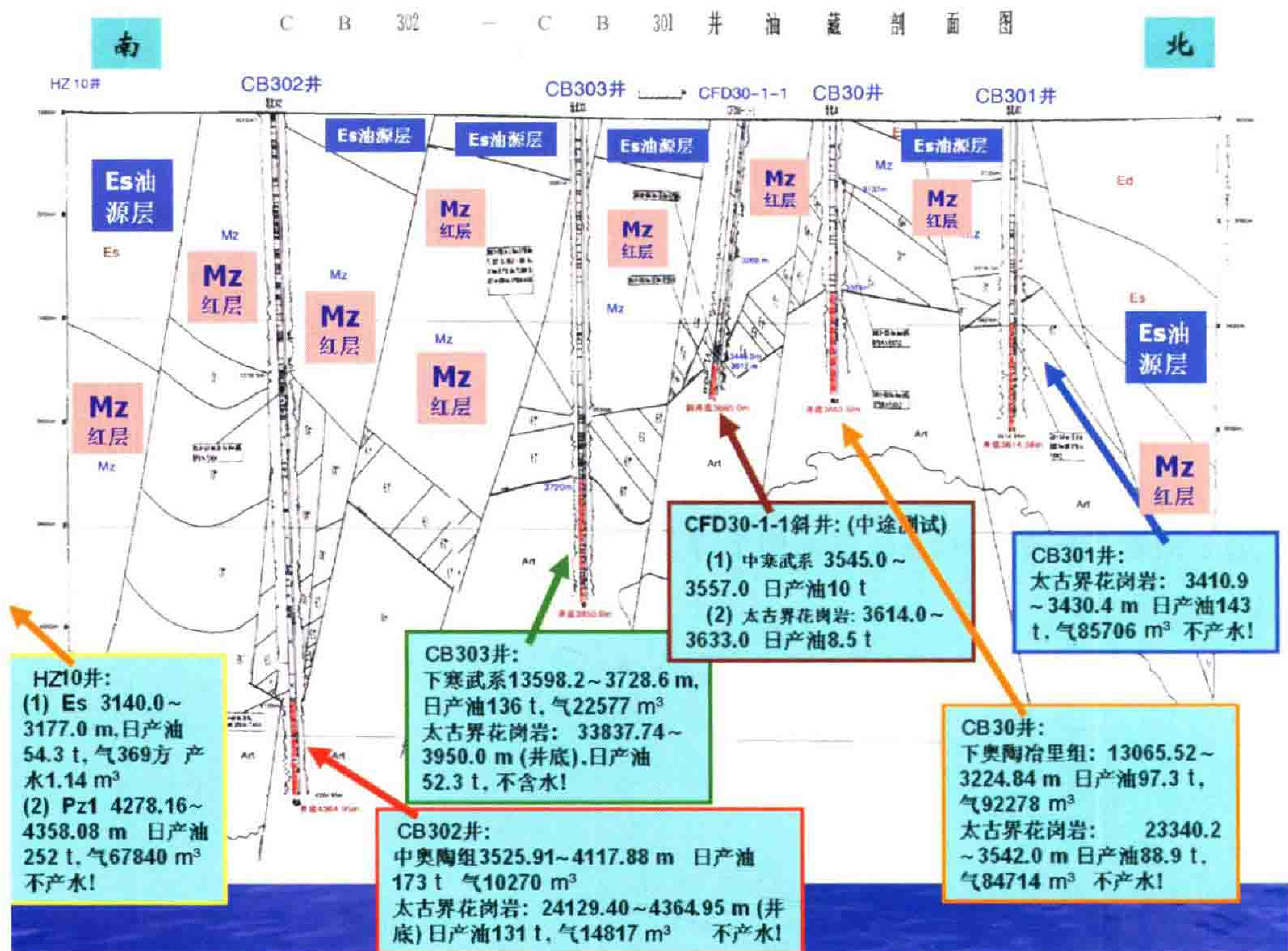


图2 埕北南北向油藏剖面里的6口井的试油情况

图 3 是南北向 6 口井的试油数据图表。

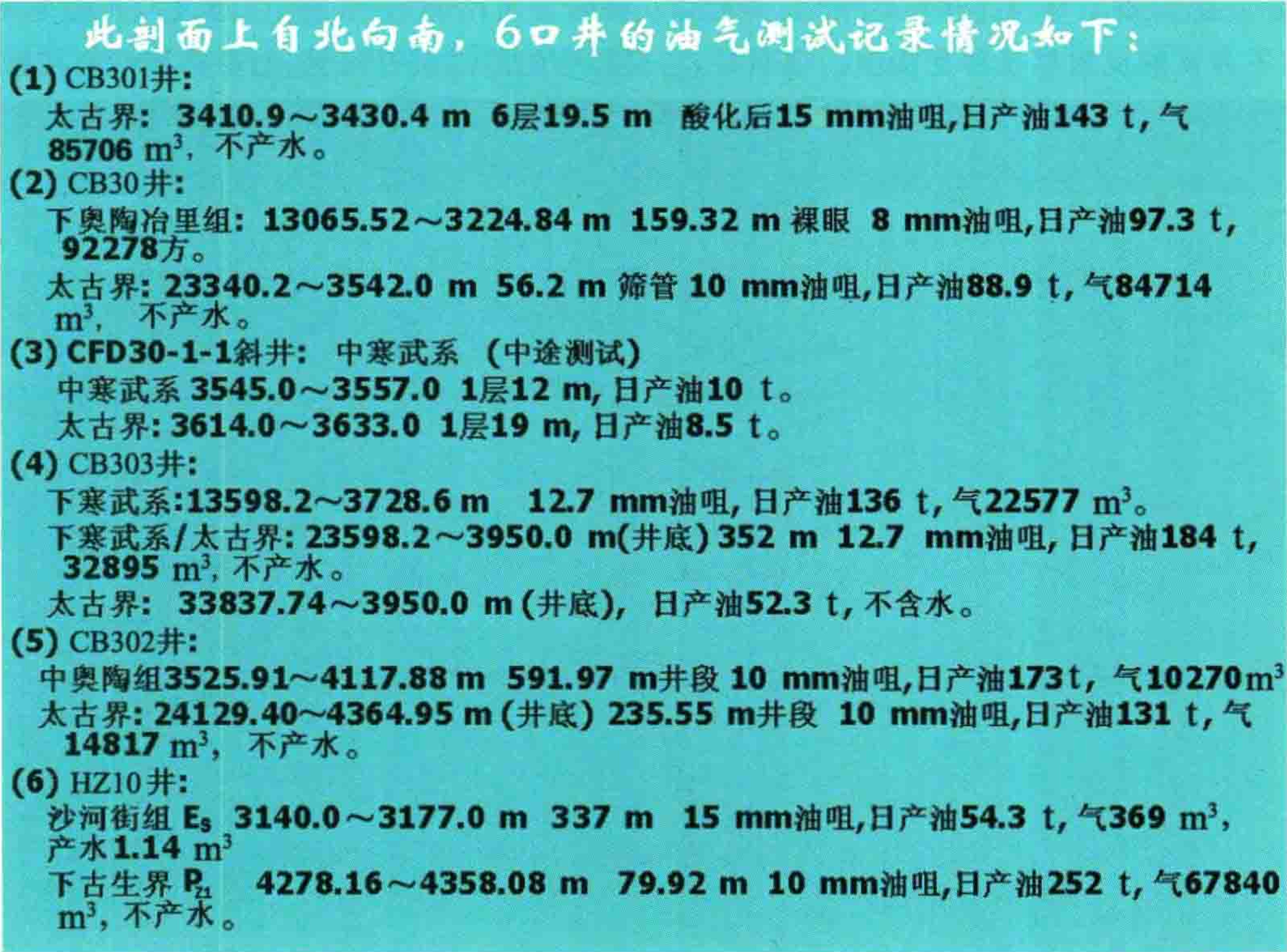


图 3　南北向五口井的试油数据

这个地区的基底 T_g 构造图如图 4 所示。所谓 T_g 是指古生界地层的顶界，或太古界花岗岩的顶界。图中红色虚点线是以下相应地震剖面的位置，圆圈是打到古生界或花岗岩的探井井位。多数井，红色圈的是出油井。只有西面的 CBG8 井是出水的(原因不明)。黄色圈是古生界产油井，未钻遇花岗岩。

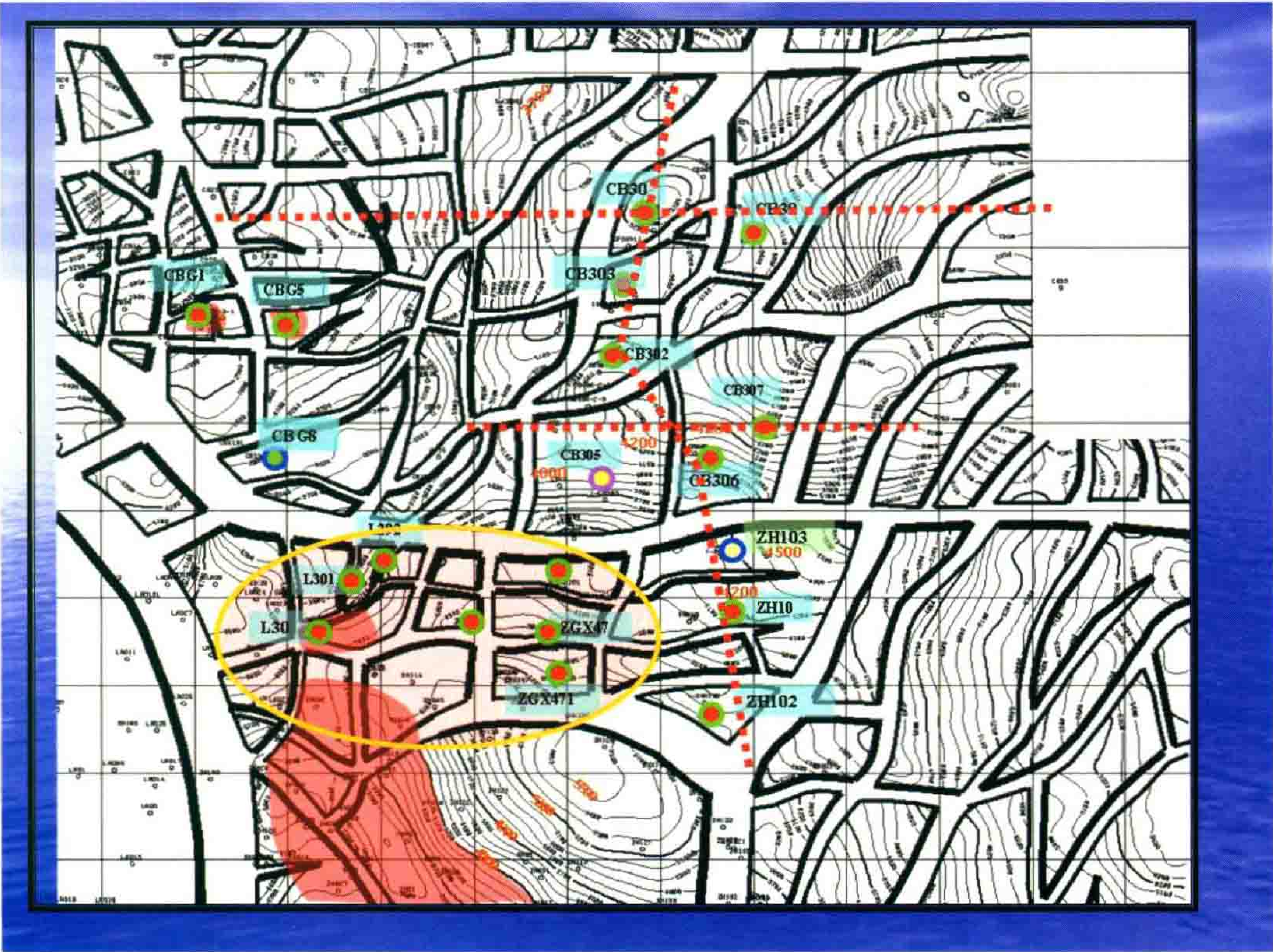


图 4　桩海地区的基底 T_g 构造图

图 5 是东西向过 CB701-ZHG20-CB302-CB308 井的地震剖面，中生界 M_z 下方的无反射区是花岗岩区，图中显示花岗岩顶界呈西高东低的情形。因此，花岗岩与古生界的产油层在西边大断层处出油应该良好。图 5 右下方良好反射层是沙河街组。很明显，它只与中生界地层有接触，与花岗岩没有接触。

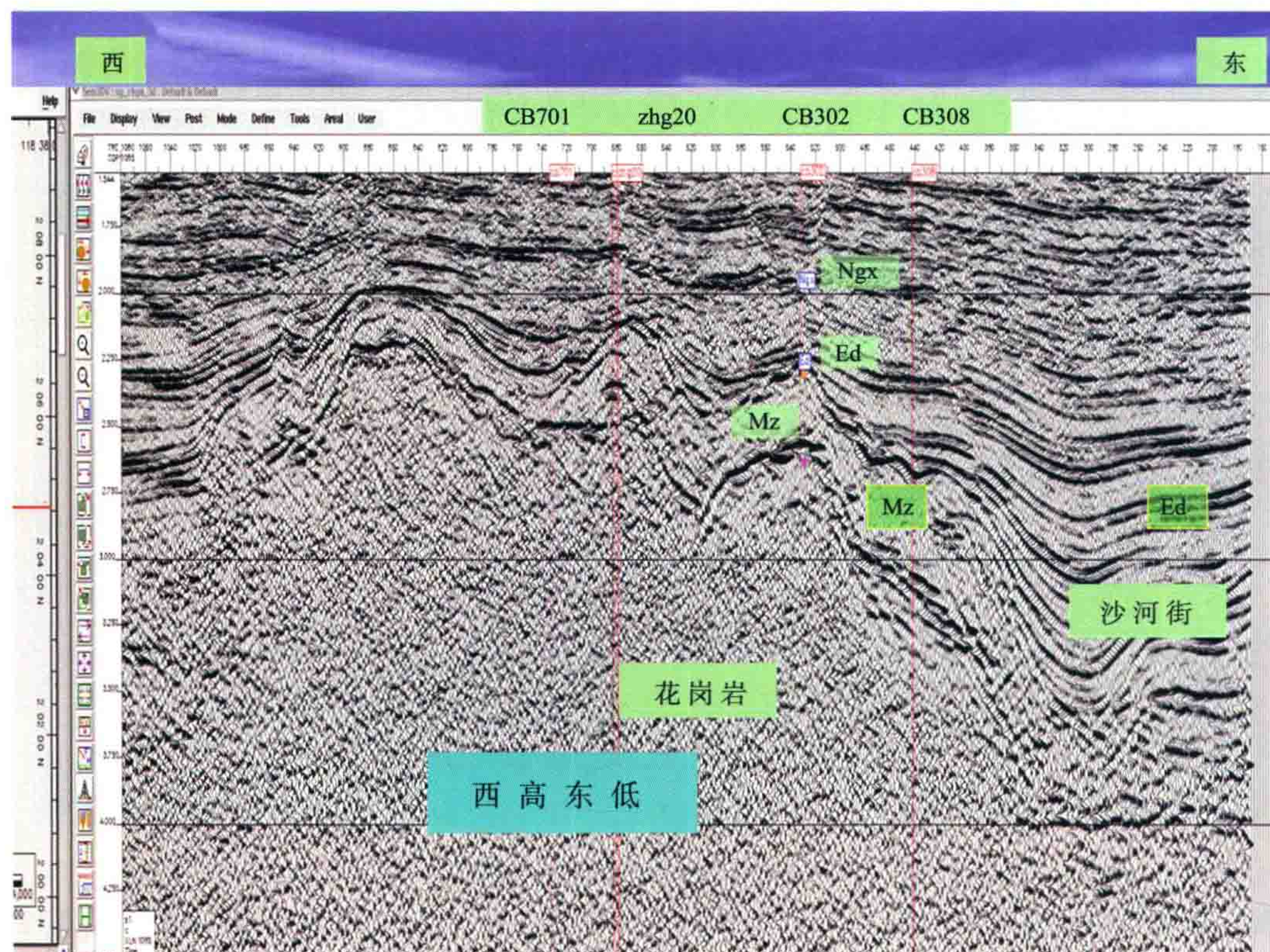


图 5　东西向过 CB701-ZHG20-CB302-CB308 井测线

图 6 是正东西向过 CB30 井测线压缩剖面，情况一样。

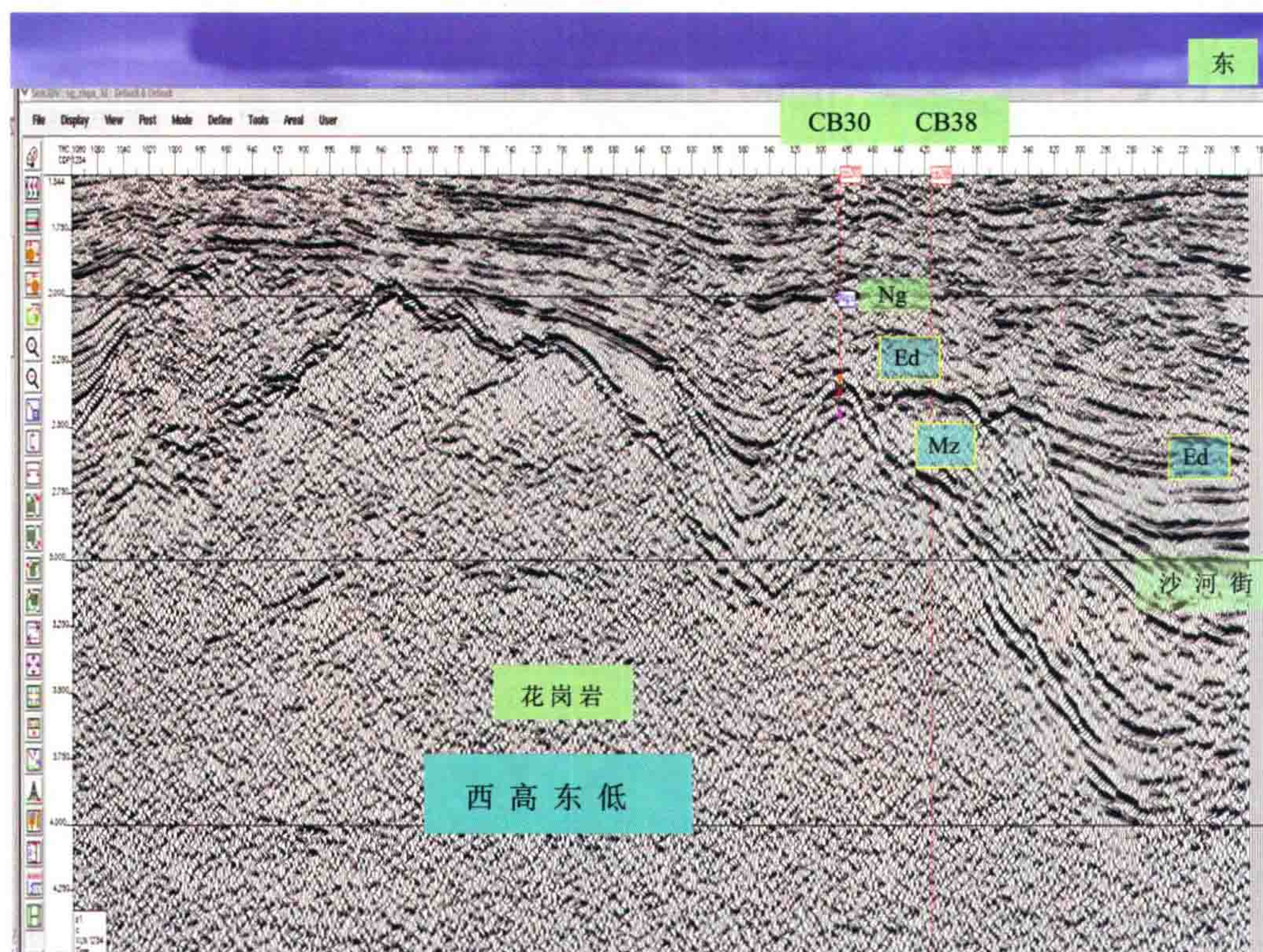


图 6　正东西向过 CB30 井测线——压缩

图 7 是南北向过 ZHH104-CB306-302-303-CB30 井的联井地震压缩剖面。可见到花岗岩埋藏深度是南低北高。南边中生界及古生界地层很厚，向北减薄。而南面凹子里的沙河街组 E_s 只是在一条大断层前与中生界对接。T_6 反射是沙三段底部油页岩的反射。

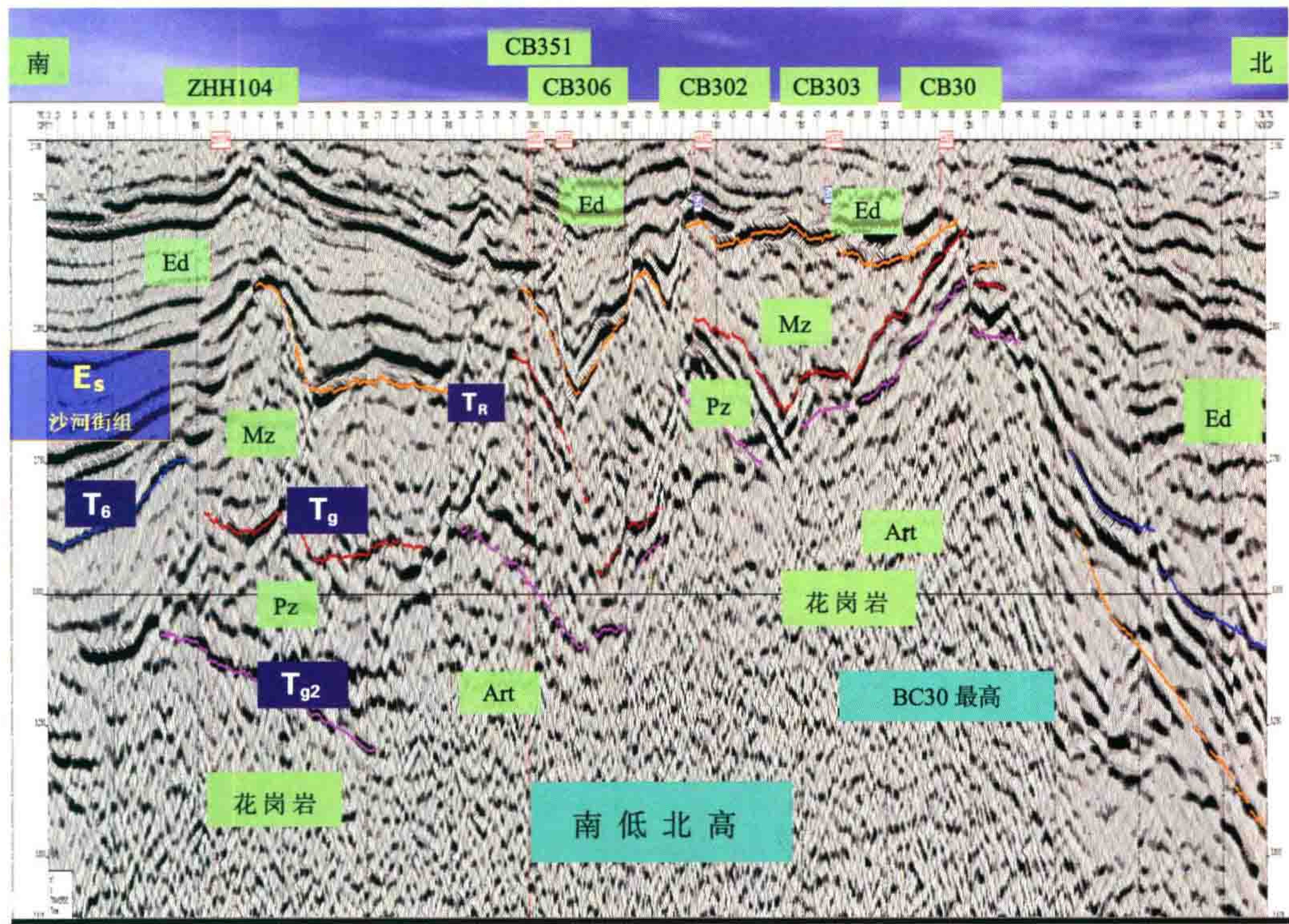


图 7 南北向过 ZHH104-CB306-302-303-CB30 井测线地震剖面

图 8 是该区南北向的油藏剖面图，ZH10 井在图中，估计那里花岗岩埋藏深度在 6000 m 以下。此图纵坐标是 T_0 时间(图上标的是转换为深度的海拔)。这幅图是胜利油田地质研究院所绘，我认为此图已经能够从客观上反映原油是从深部而来的。

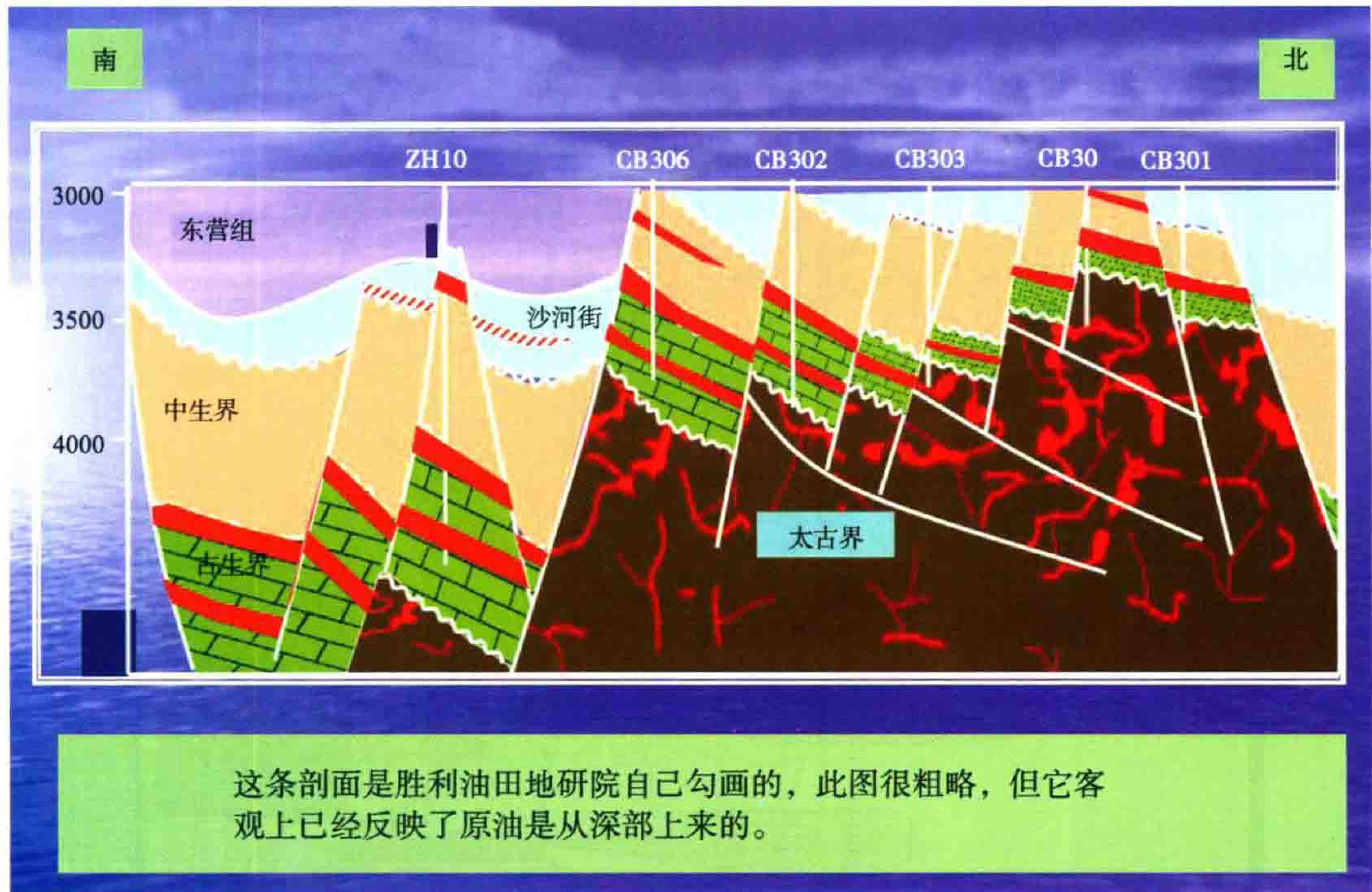


图 8 该区南北向的油藏剖面图

但是还有一些人仍坚持“新生古储”的观点，他们说：花岗岩里的油是沙河街烃源岩的高压使原油沿断层倒灌到下面花岗岩里去的。众所周知，倒灌到上千米以下那里地层压力更巨大，显然这个假设很难成立。

（一）产量的情况

本区下古生界寒武-奥陶系的灰岩也含油，由于灰岩风化后缝洞发育，所以古生界产量较稳定。而太古界花岗岩虽然为巨大的块状构造油藏，但靠裂缝储油，不均质性很强。产量没有古生界稳定。

但太古界也有好的，例如 ZG10-3 井，从 1985 年至今，单井累产已产油近百万吨，可称胜利油田高产井的奇迹了。目前仍然日产油 170 t 左右，是典型的高产、稳产井。在同一断块上钻的 4 口开发井（图 9 下方 4 个红黄绿圈）产量也不错，但井间有明显的干扰，说明沿着大断层有较好的联通性。

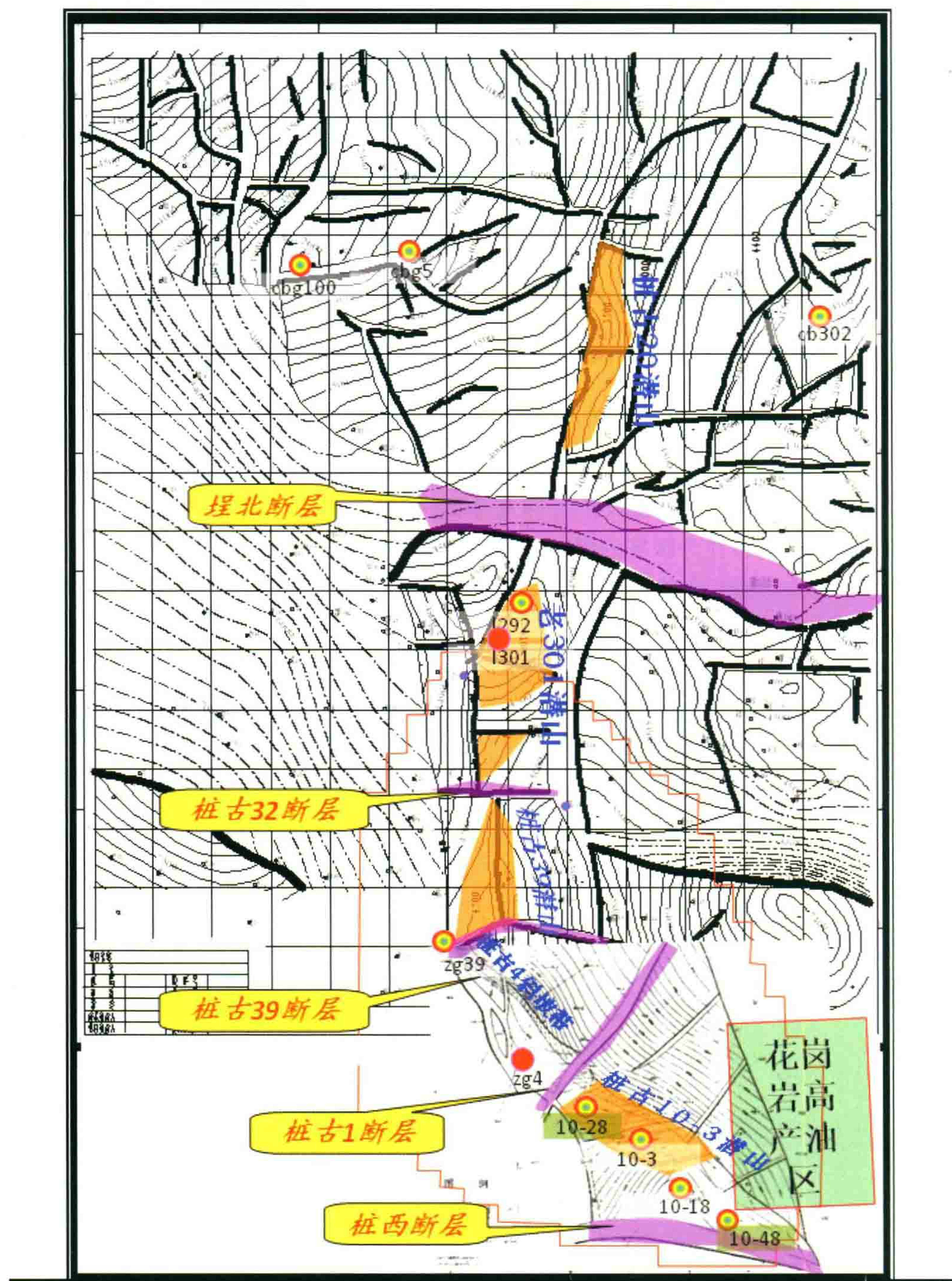


图 9 桩海-埕北 T_{g2} 构造拼图

ZG10-3 井的数据：完钻井深 4771.8 m，钻遇 Art 地层 132 m，测试 4658.9～4771.8 m，厚度112.8 m。酸化前稳产 160 t/d，7 年后降至 100 t/d，2001 年酸化后产油又稳在 170 t/d，不含水。

其北面 ZG25 井：钻井过程中见荧光 7.7 m/4 层，∈－Art3831.4～4116 m 井段，套管畅喷，日产油 1087 t，气 16.5×10⁴ m³。

ZG10-3 井高产区位于桩海油田的南端。它和埕北没有完整的构造图，我近来拼接了一张，见图 9。下方是花岗岩油田的高产区，称桩古 10-3 潜山。图下方 4 口井都是高产生产井。

图 10 是连接埕岛-桩海的北东—西南向地震时间偏移剖面。此图更清楚的显示了南北向的构造特点，花岗岩南低北高。南面 ZG10-3 井(黑柱子)打在大断层上进入花岗岩 112 m。

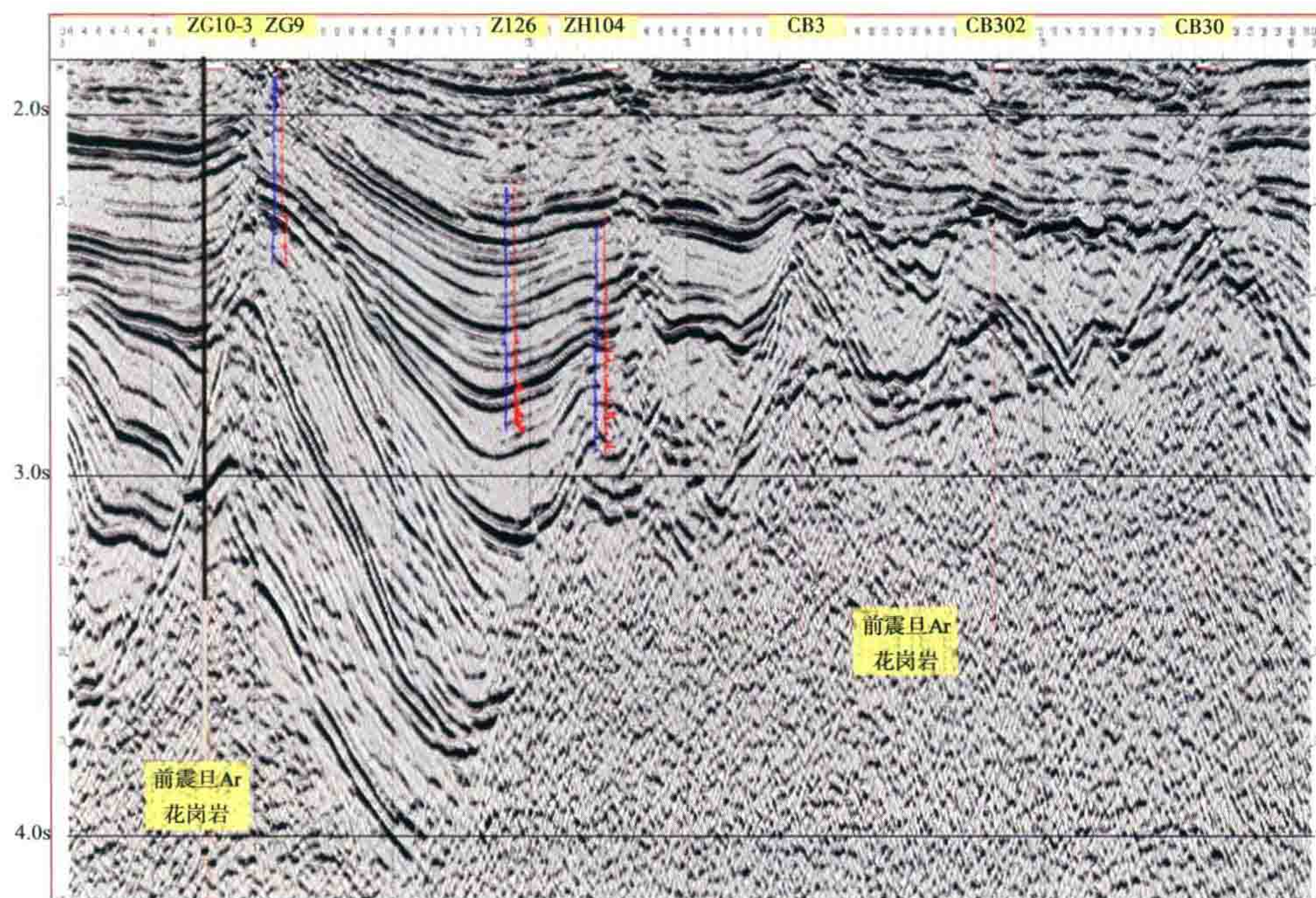


图 10　连接埕岛-桩海的北东—西南向地震时间偏移剖面。

图 11 是 ZG10-3 井花岗岩高产区的 T_{g2} 构造图，图中橘黄色区为目前认识的高产区面积。此图中打到花岗岩的井只有 4 口，都出油。ZG10-3 及 ZG25 井(黄绿圈)为高产稳产井，其他 2 口(ZG22 及 ZG43)井也出油。*

此图没有把高产区南面的大断层表达好。图 11 中大断层的落差很小，甚至是反的。我认为可能是大断层南面的作图层位有问题。大断层以南不是 T_{g2}，而是断层面。(T_{g2} 是寒武系海相馒头、毛庄、张夏地层的综合反映，是一个低频强反射，特征很明显。)请参看下面图 13 地震剖面。

图 11 中北东向蓝色细线是过 ZG10-3 井的北东—南西向叠前深度偏移地震剖面所在的位置。

* 在图幅外的另外 3 口开发高产开发井见图 9 下方。

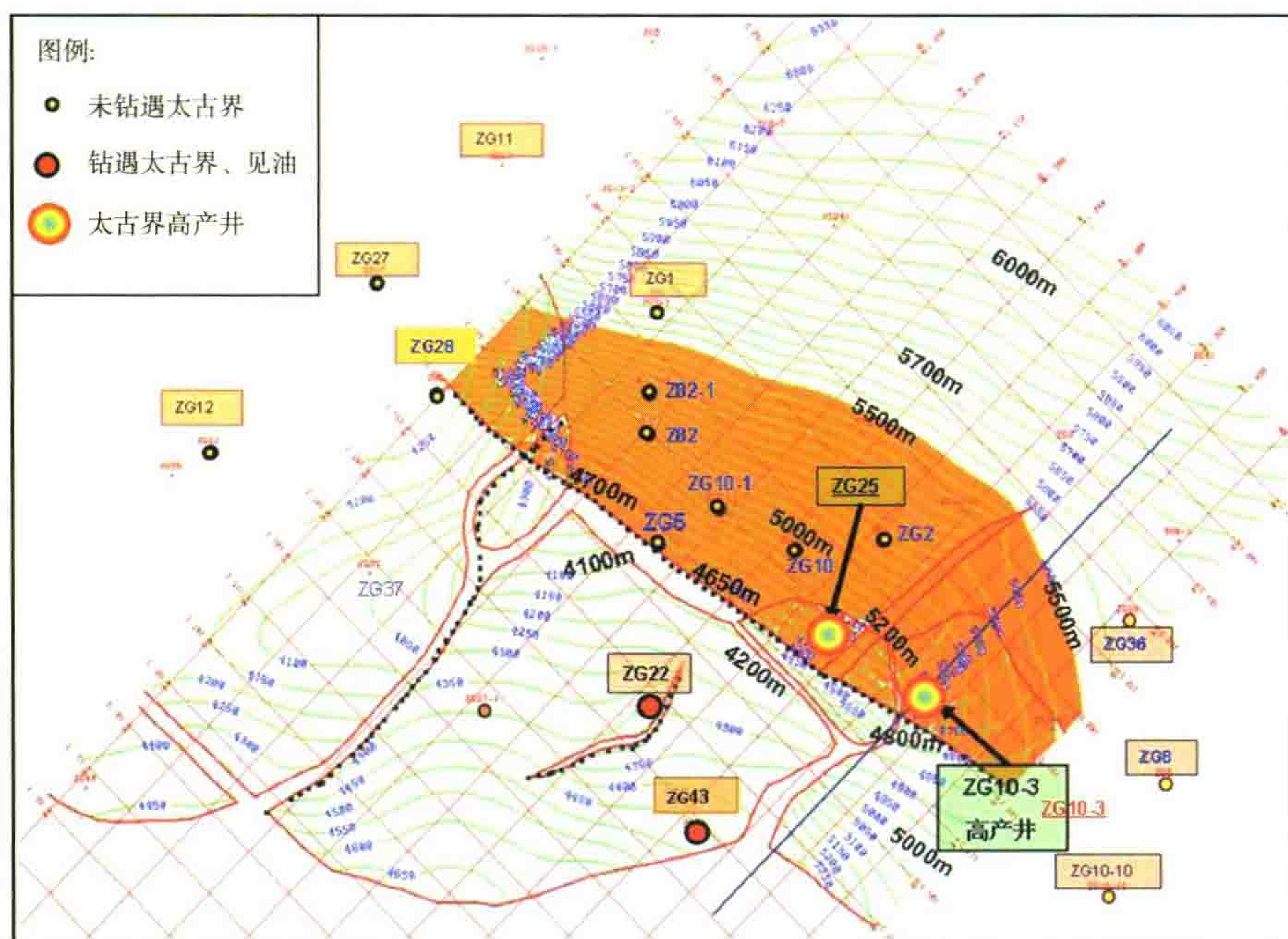


图 11 ZG10-3 井花岗岩高产区的 T_{g2} 构造图

从图 12 剖面里可以看到左边深蓝色 T_6 反射标准层上方是沙河街组 E_s 的所谓生油层，它只与大断层北盘的寒武-奥陶系接触(图中大断层上段由于断层两侧新老地层波阻抗差别太大，有明显的断层面陡反射，判断落差至少 1000 m，这也是一个旁证)，而沙河街组 E_s 所谓“生油岩”与花岗岩没有相遇。

我认为这条大断层的落差应该很大。高产区大断层以南的 T_{g2} 应该埋藏很深。该图中浅黄色断层是我的解释方案。

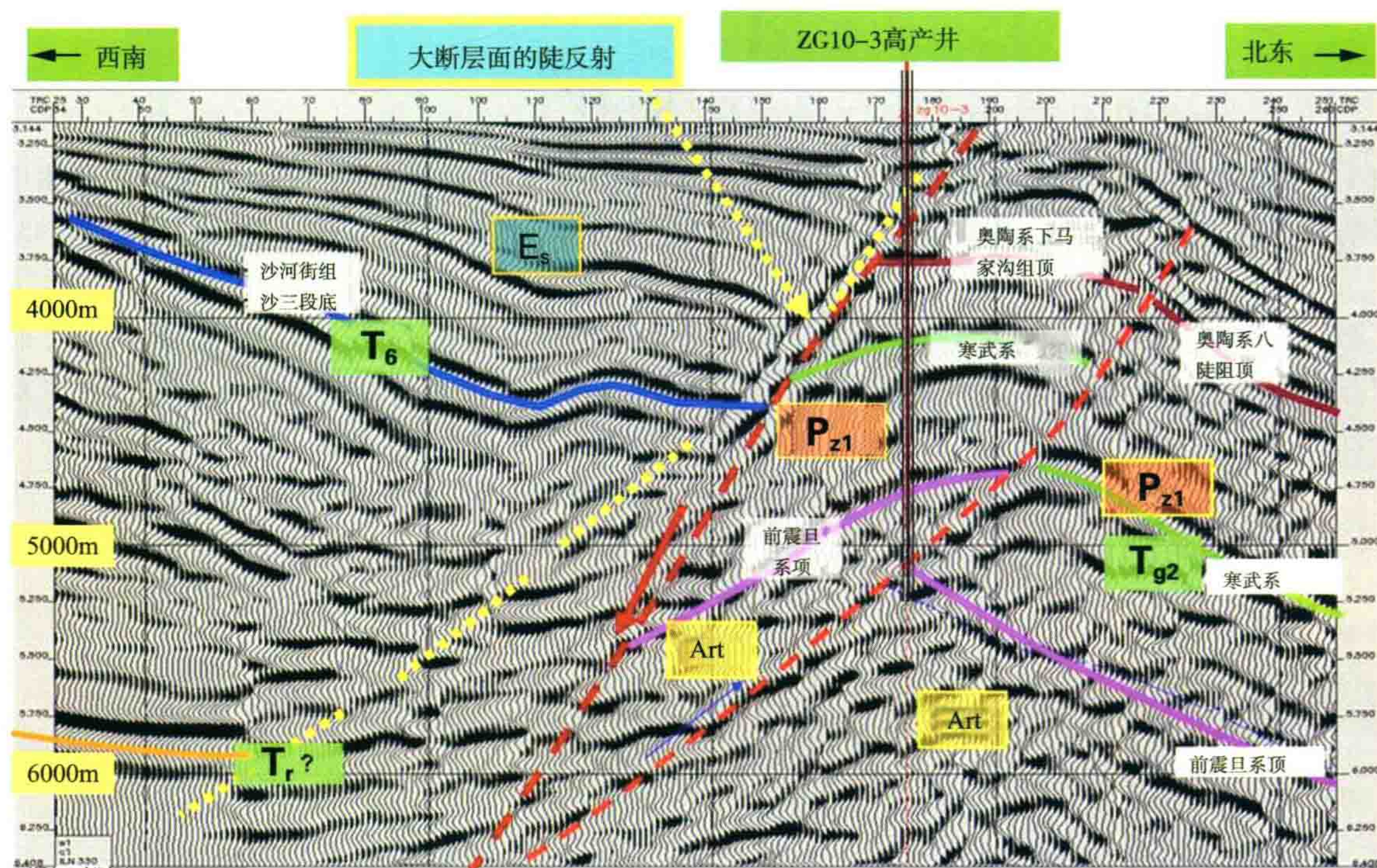


图 12 ZG10-3 井的南北向地震剖面

为了把 ZG10-3 井的来龙去脉进一步搞清楚，胜利油田研究院给我展示了一条长剖面。图 13 是高产区近南北向地震叠前时间偏移剖面。此剖面很长，我把它横向缩小了 1/4，构造的格局就比较清楚了。可

以看到左边地层间存在有明显的 3 个角度不整合，如 3 个椭圆形框所示。

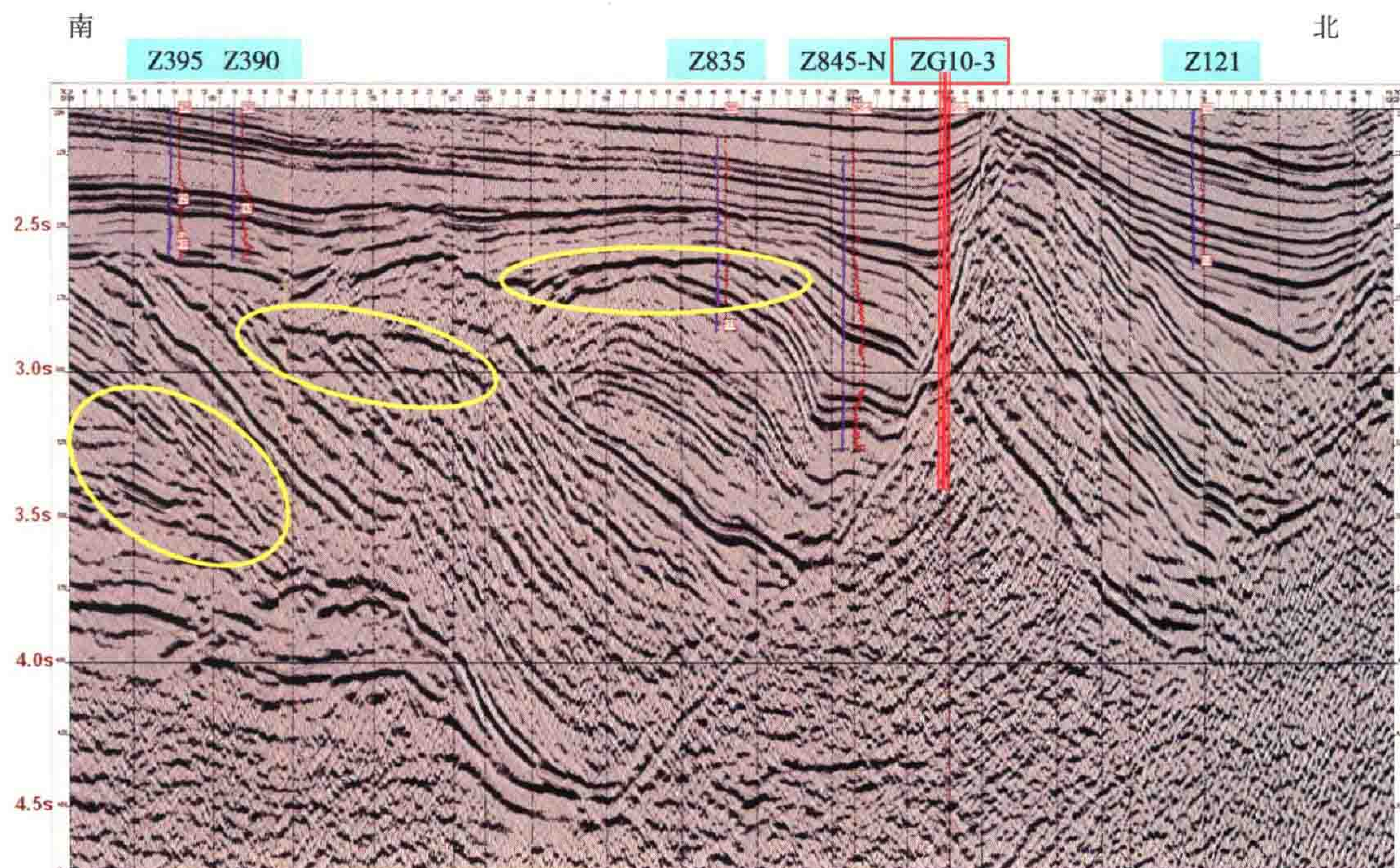


图 13　高产区近南北向地震叠前时间偏移剖面

将此剖面横向压缩 4 倍，可以清晰地显示三个角度不整合。

ZG10-3 井是太古界花岗岩高产井，已经累计产油近百万吨。

图 14 是我对此剖面的地质层位的认识。

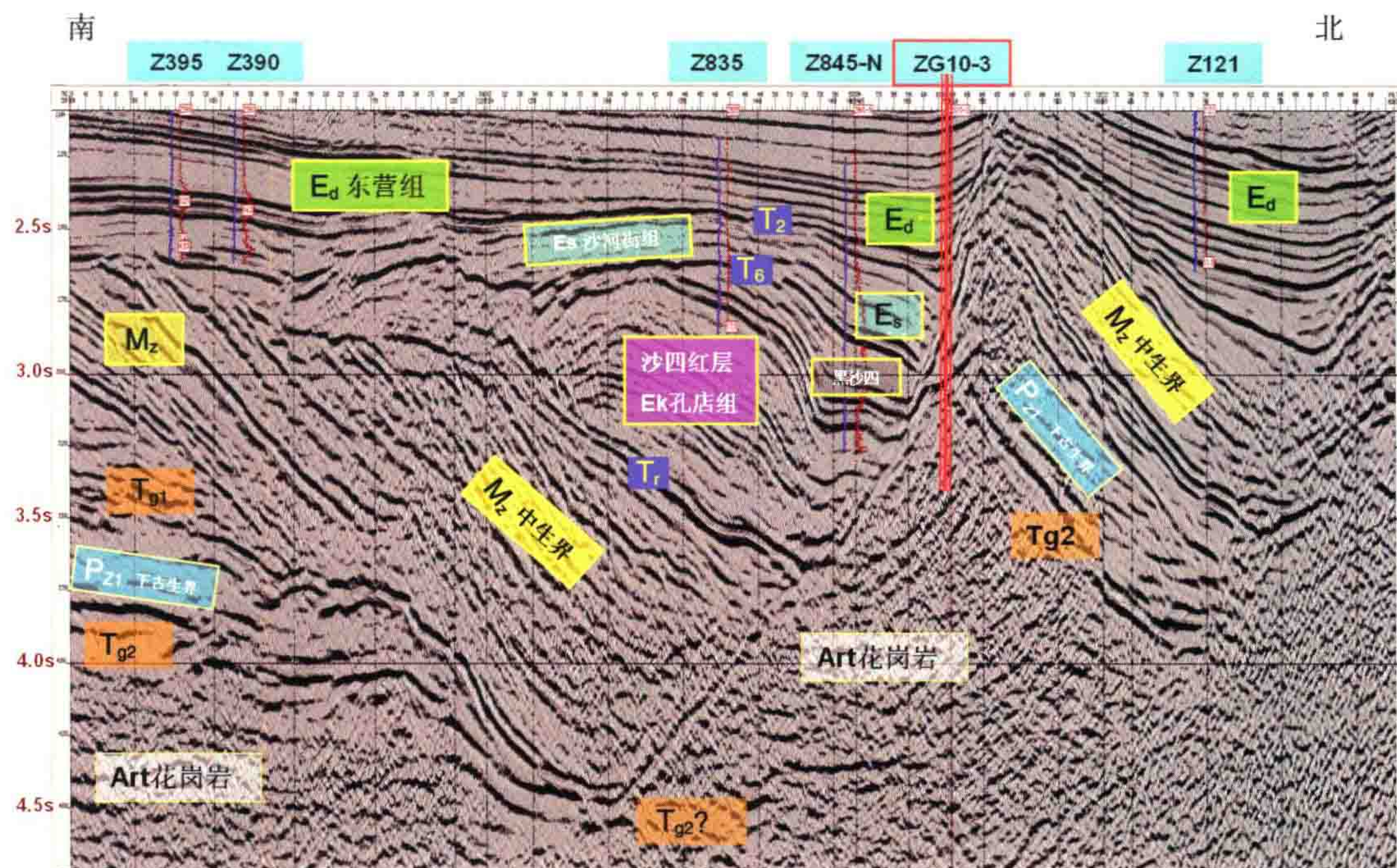


图 14　高产区近南北向地震叠前时间偏移剖面的层位解释

Z845-N 井所揭露的黑沙四 S4 上地层与 Es 沙河街组之间存在角度不整合。

右方太古界花岗岩与沙河街组没有接触，只是与黑沙四及其以下的地层相遇。

图 14 里，Z835 井下方的 2.7 s 处见到 E_s 沙河街组与沙四孔店组 E_k 的不整合。再向左看，左边深

2.8 s处，有孔店组红层与棕红色陆相中生界 M_z 陡反射的不整合。而左边边界 3.0 s 处，可以看到产状交平的下古生界 P_{z1} 与中生界陡界面的不整合。3.4 s T_{g1} 反射是奥陶系灰岩，下面 T_{g2} 是寒武系，P_{z1} 的产状比较平缓。顶部有削蚀，从剖面中部到大断层处只剩 T_{g2} 反射(深 4.5 s，约 7000 m)。

根据 T_{g2} 看，此大断层的落差达 4000 m(3～4.5 s)，我认为它是这里高产区的油源断层。巨厚的 E_k 及 M_z 都是红层，不会生油，油应该是从深部上来的。

坚持有机生油论者说："这条剖面上北盘的太古界花岗岩与沙河街生油层直接对接，而且此大断层没有粗相带的阻隔，所以 ZG10-3 井的高产油藏是属于新生古储型，油还是沙河街生的。"

我认为对这条剖面的层位应该这样来认识：图中 T_2、T_6 及 T_r 三个层位是不容改变的。T_6 反射层是沙3 段底部油页岩段，从 T_2 到 T_6 就是通常我们认为是沙河街组，而 Z835 井下方的 2.7 s 处，见到 E_s 沙河街组与沙四孔店组的明显角度不整合。沙河街组内部从来没有发现明显的不整合，因此，顺着 T_6 层判断，此剖面里沙河街 E_s 组与大断层北的太古界花岗岩并没有接触到。

但剖面里还有一口 Z845-N 井，该井在沙河街组之下，揭露了一段黑色泥岩段，这便是所谓沙四上"纯化镇组"，或称黑沙四(见图中标出)，人们认为它也能生油。**而在这条剖面里，黑沙四的确与大断层北的太古界花岗岩并接触了。所以，准确地说，花岗岩并没有与沙河街接触，而是与黑沙四接触了。**黑沙四之下与花岗岩接触的依次是：沙四红层，它是一套含盐膏的红色泥岩；再往下是 E_k 孔店组及中生界，它们都是红色层，是不能生油的。

值得我们思考的是与花岗岩接触的这个黑沙四的分布是非常局限的(剖面中只是很小的一个凹陷)，如果说它能生油，渗出来的油是远远不足以填满整个这地区的油藏的。

图 15 是 ZG10-3 井高产、稳产井的历年产油曲线，从产油曲线上我们可以深信：这样稳定的高产油流不可能在黑沙四的小凹子里从黑色泥岩中不断供应出来。

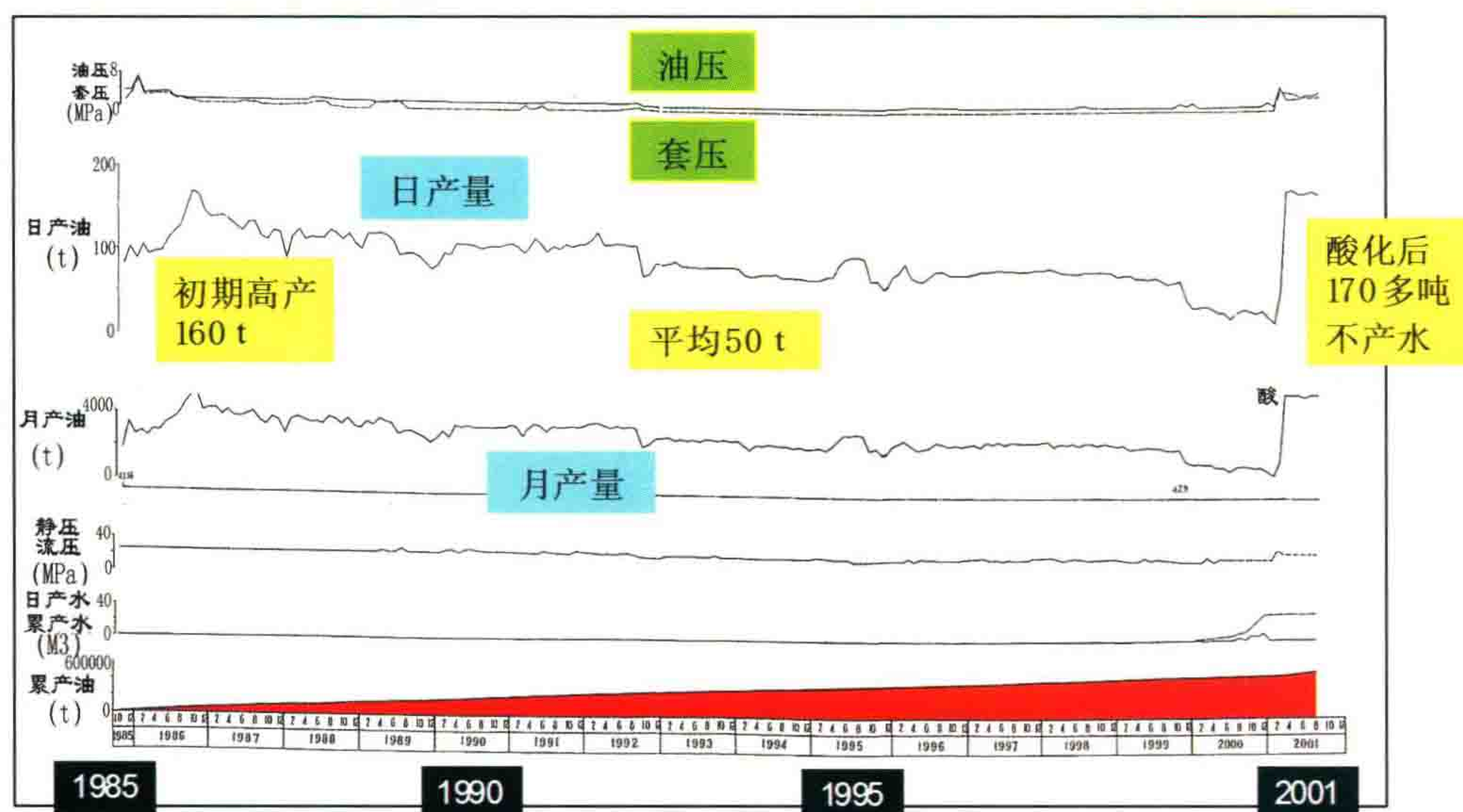


图 15　ZG10-3 井高产、稳产井的历年产油曲线

本区的几点基本事实如下。

(1) 从南面五号桩潜山到北部埕北地区，所有的花岗岩里都装满了油。**南北向长约 20 km，东西向平均 7～8 km，含油面积约 150 km²，储量很大。**目前来看最深的储层可达 4771 m 深(ZG10-3 井底)，还没见底。

(2) 所有打到花岗岩的井，测试结果都产油不见水。凡是打在断裂带上的就有高产，ZG10-3井已经连续高产30年，单井累产接近10^6 t。这是渤海湾地区石油勘探史上少有的奇迹。

(3) 所有的地震剖面都没有见到花岗岩与所谓沙河街组生油岩有所接触，只有南面桩古潜山与黑沙四(**纯化镇组**)有一段接触。而ZG10-3井30年来至今产油不产水，似乎4771 m以下原油可以源源不断地供给，**每天稳定产油160 m^3。这绝对无法用断层面上接触的黑沙四局部小洼陷里生油，从侧向生油，源源不断地供给来解释。**

(二) 小结

图11中橘黄色的区块是胜利油田目前认为的花岗岩高产断块，海拔深度标高从4500 m到北面为5500 m。我认为从ZG10-3井所产的近10^6 t石油，可能不是靠这断块里的花岗岩裂缝中横向连通而来，因为没有打在断层上的井并不高产。

我深信，ZG10-3高产稳产的原因，就是它沟通了大断层深部的原油，使之源源不断地从深处抽吸上来，所以能高产、稳产。**今后，花岗岩的探井应该有意识地往大断层上打。图9中，从桩海到埕北，基底大断层还有不少，这样的高产井还应该能找到不少。**

我认为这个例子是原油从地壳深部来的重要证据，因为此处深部再也没有所谓的"生油层"了。

最后，在这里我要感谢胜利油田由两个研究院给我提供的这些素材，它们十分宝贵。

二、方正断陷的油气来自何方?

(一) 方正断陷的概况。

郯庐深大断裂的南支位于吉林省境内，称伊通地堑，已经找到岔路河断陷含油，提交石油探明储量3 000×10^4 t(图16)。

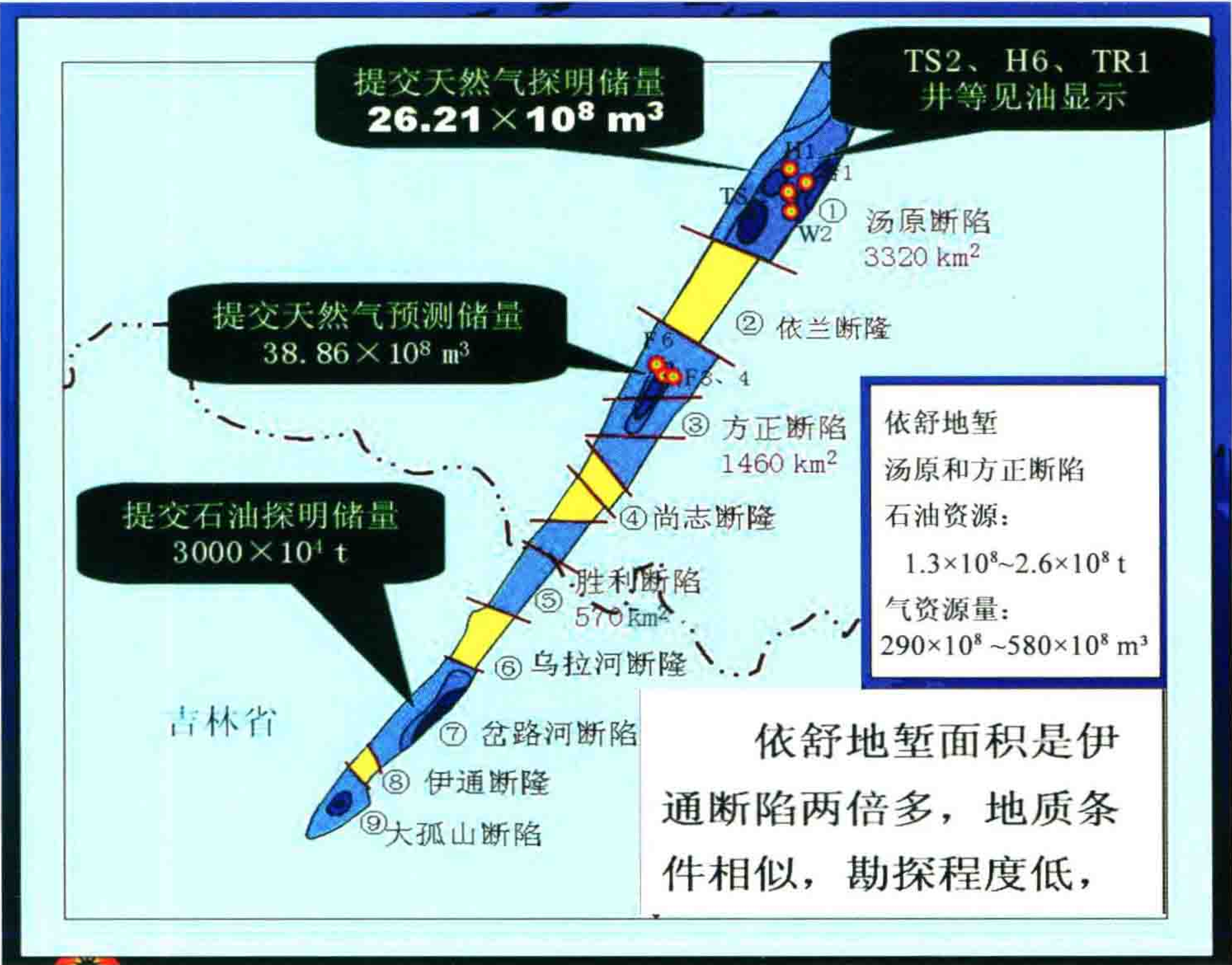


图16 依舒地堑位置(郯庐深大断裂)

大庆油田的外探区——依舒地堑——是郯庐深大断裂的北支，在黑龙江省内。前几年在汤源断陷中发现油气。最近在其西南方正断陷里开展勘探工作，方正断陷面积 1460 km^2 已经打了 9 口探井，没有什么油气发现。最近在向斜里打井，F4 井及 F6 井在第三系底部砂岩中都见到良好的出油层位。

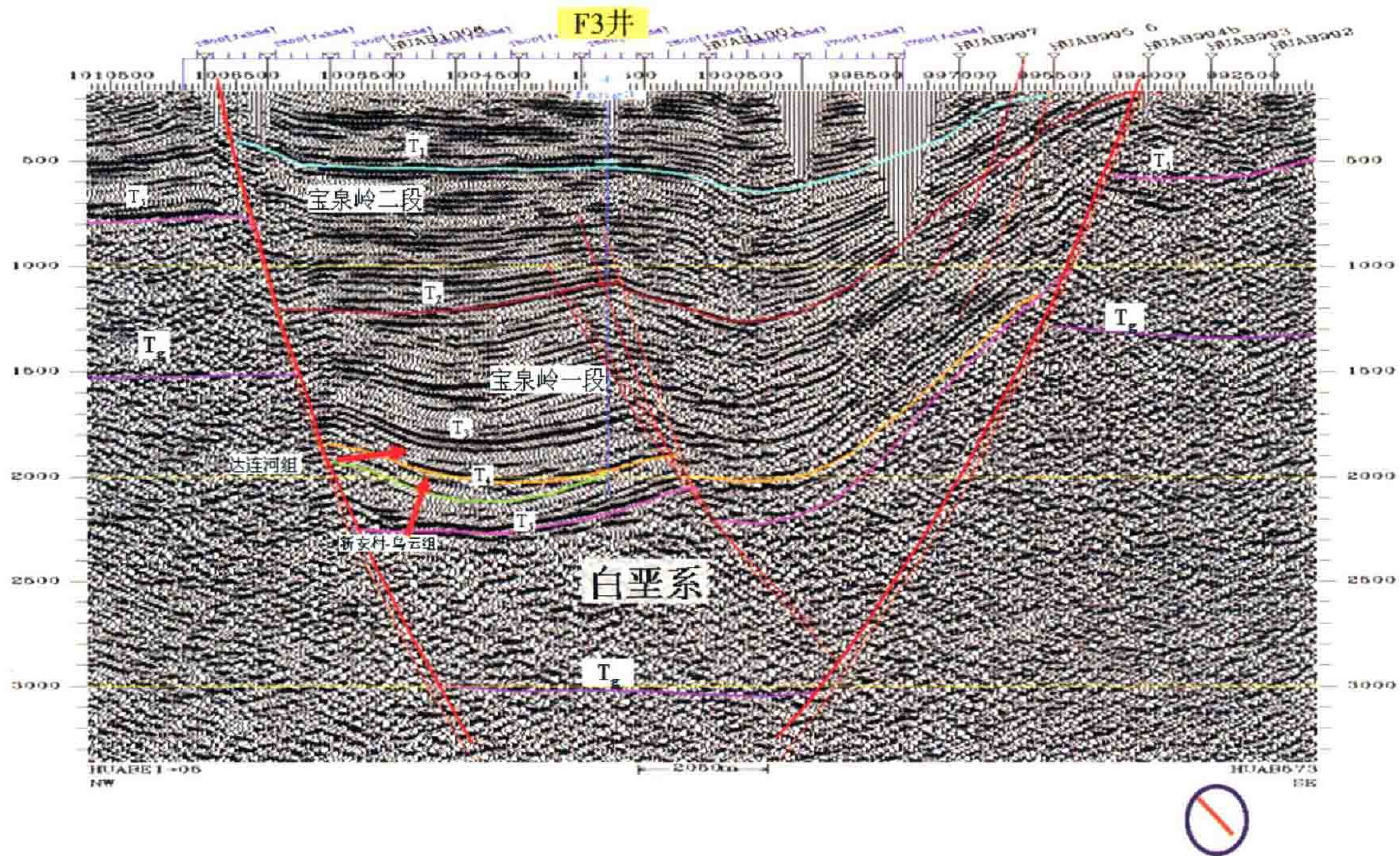


图 17　方正断陷 fz2d—573 地震解释剖面

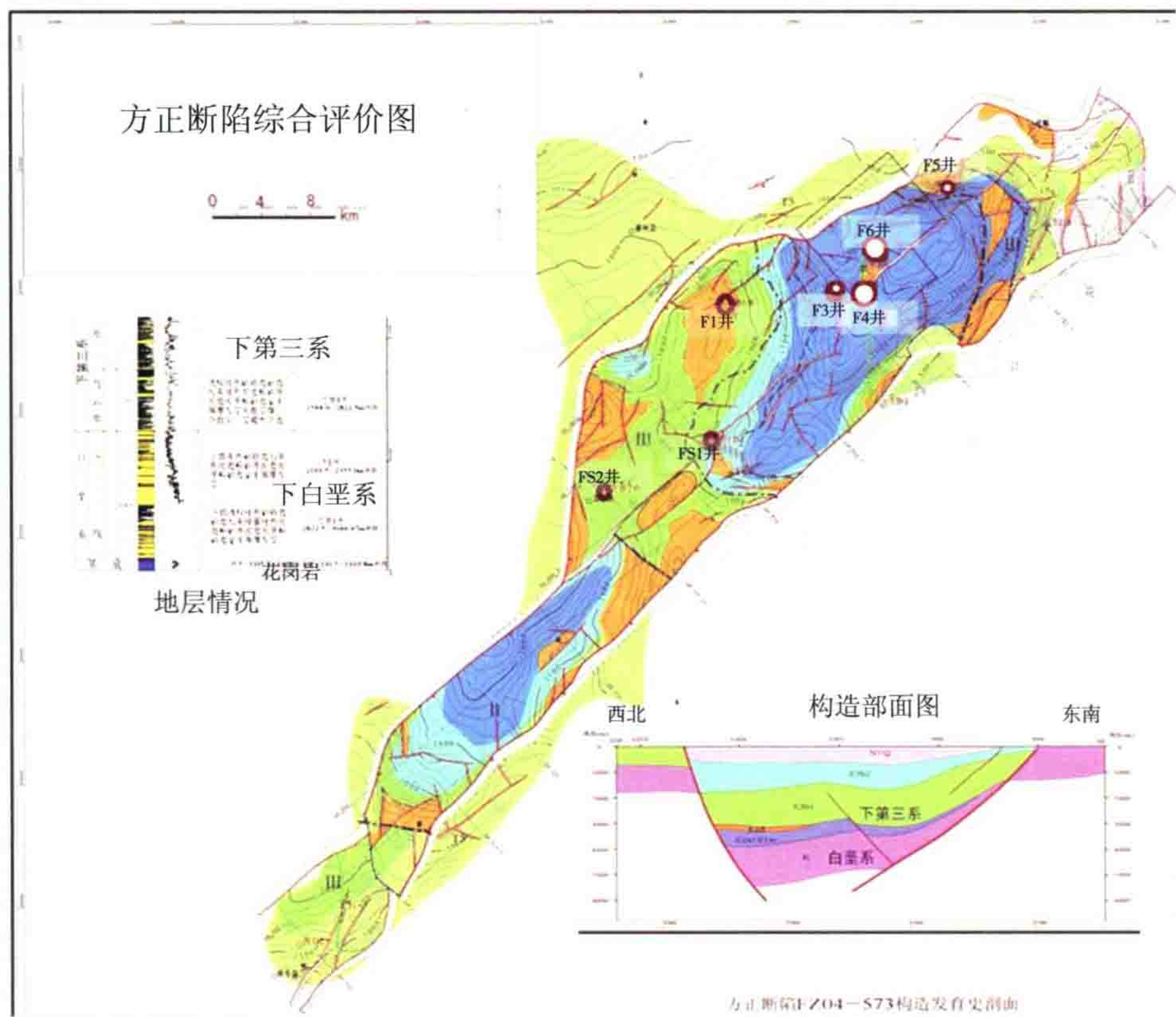


图 18　方正断陷综合评价图

F6井出油10.8 m^3/d，层段2994～2999 m，其下白垩系有50 m油气显示。

F4井出油96.0 m^3/d，产气22400 m^3/d。层段3213～3240 m，其下白垩系有80 m油气显示。

两井油层高差220 m，都未见底水，估计是柞树岗向斜全部含油。

奇怪的是，为什么在向斜里出油，而且井底钻遇的白垩系有50～80 m的油气显示，直到井底？到底是什么油藏类型？哪里来的油？这引起人们的极大兴趣。

图19 北东—南西向方正断陷的联井地震解释剖面

图20 北西—东南向方正断陷的地震剖面

(二) F4井及F6井获得油气高产(图21、图22)

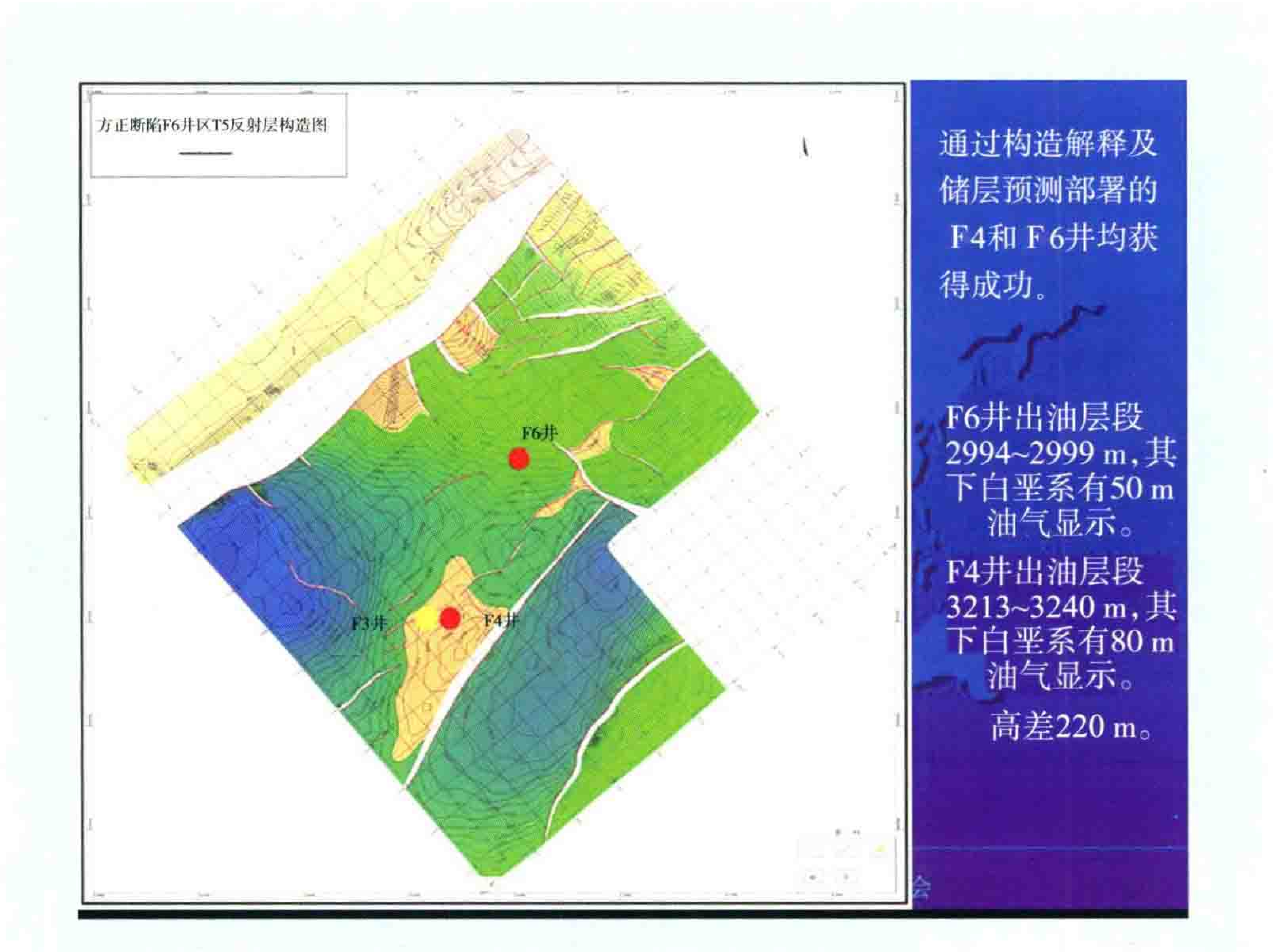


图21 两口油气发现井的井位

2006年,在方正断陷有利区柞树岗向斜部署了F6井,该井E_1第三系含煤段下2994～2999 m底砂岩井段于2007年元旦试油压裂获得10.8 m^3工业油流。其下白垩系顶部有50 m油气显示。

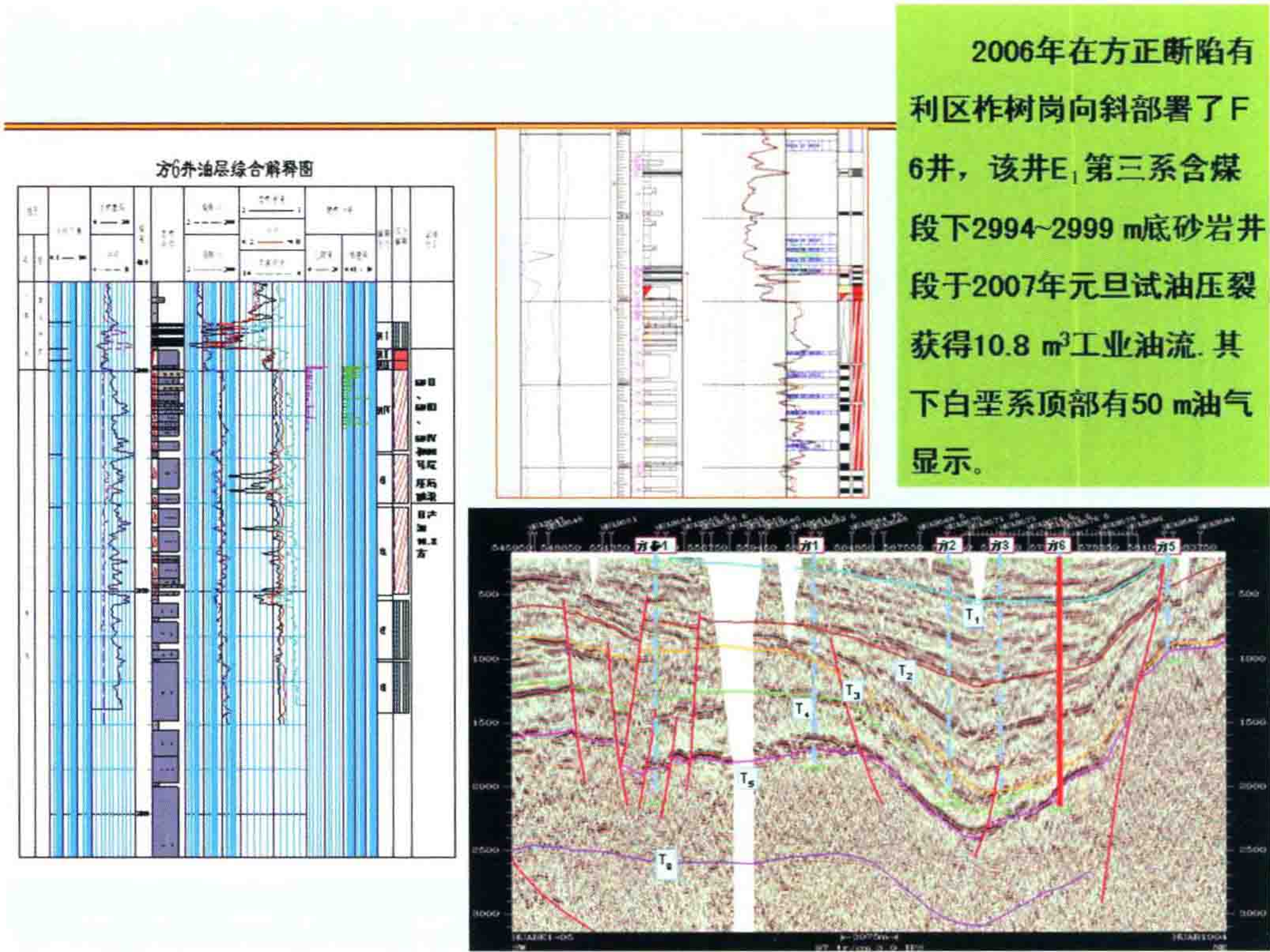


图22 F6井的油气发现

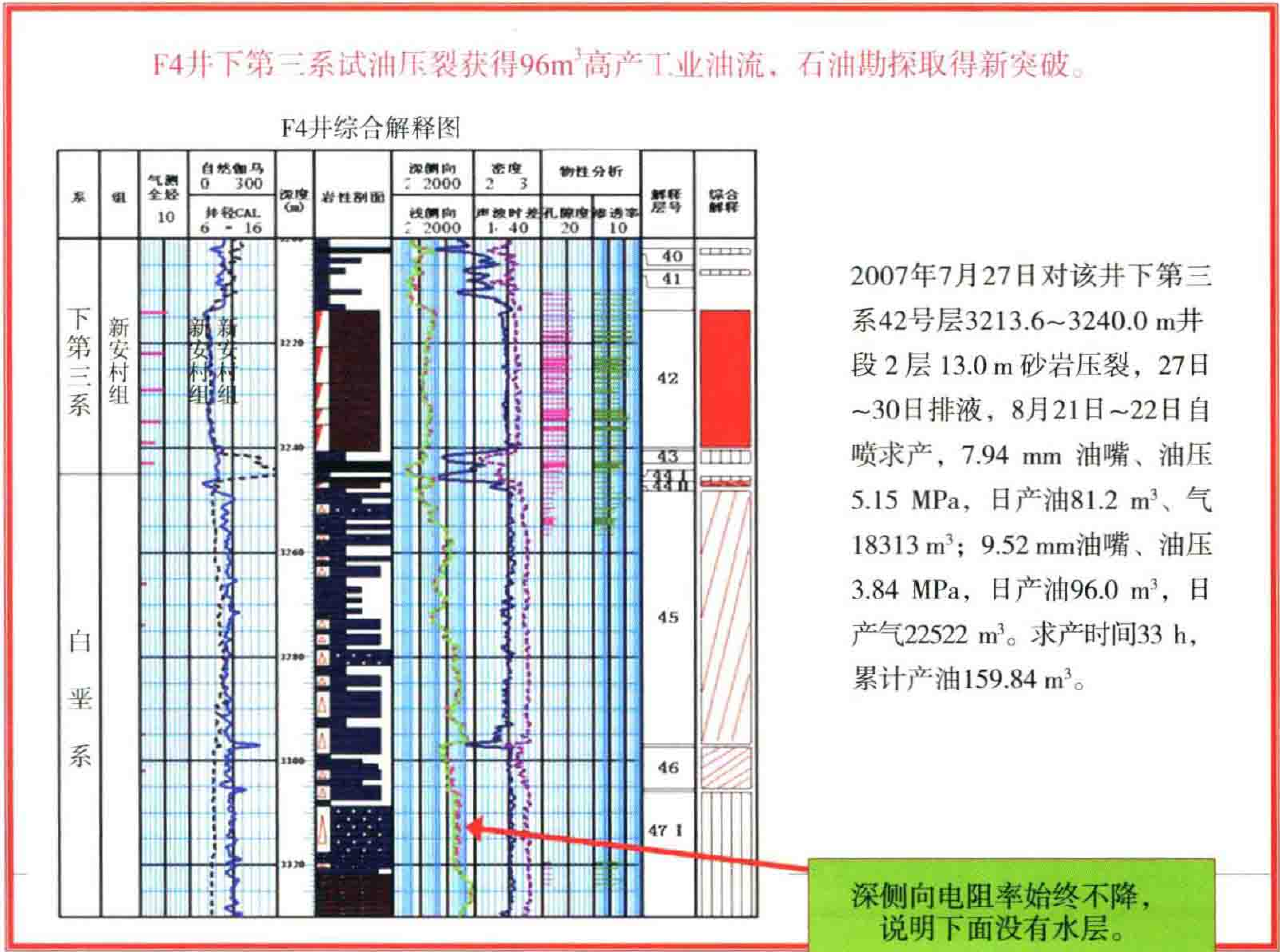
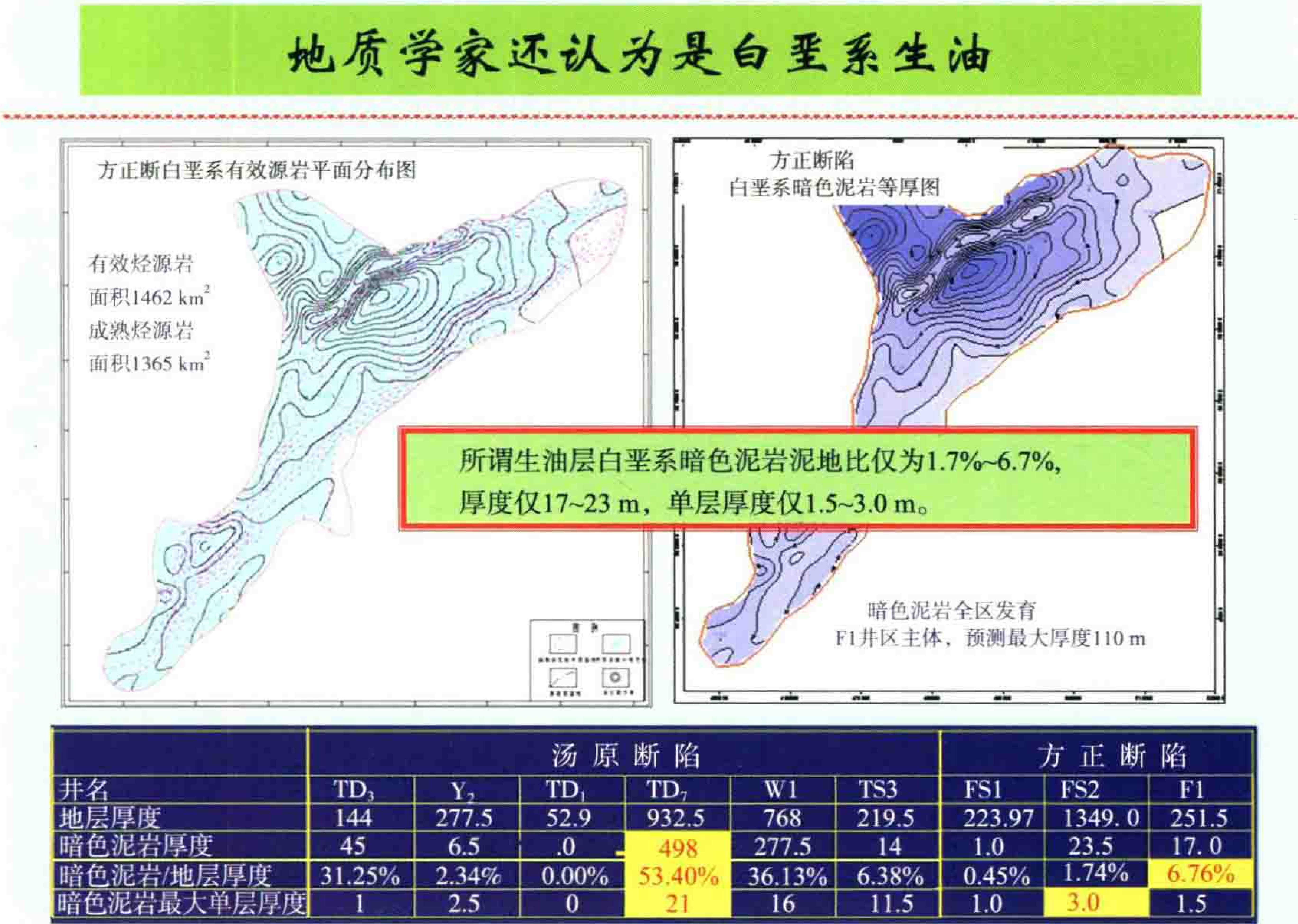


图 23 F4 井的油气发现

（三）对油源的认识



	汤原断陷						方正断陷		
井名	TD_3	Y_2	TD_1	TD_7	W1	TS3	FS1	FS2	F1
地层厚度	144	277.5	52.9	932.5	768	219.5	223.97	1349.0	251.5
暗色泥岩厚度	45	6.5	.0	498	277.5	14	1.0	23.5	17.0
暗色泥岩/地层厚度	31.25%	2.34%	0.00%	53.40%	36.13%	6.38%	0.45%	1.74%	6.76%
暗色泥岩最大单层厚度	1	2.5	0	21	16	11.5	1.0	3.0	1.5

图 24 生油岩的情况

这个凹陷里有 4 口井钻遇白垩系，没有井钻穿白垩系，钻遇厚度最大为 FS2 井，1349 m。但是，方正断陷里所谓生油层白垩系暗色泥岩泥地比，仅为 1.7%～6.7%，厚度仅 17～23 m，单层厚度仅 1.5～3.0 m。这样的白垩系怎样能生油？

因为方正凹陷的 1300 m 白垩系不像能生油，所以这个凹陷的生油指标不得不从位于东北 60 km 的汤源断陷来说明问题，称 60 km 外的汤源断陷里的白垩系是深湖相和水下扇沉积。但是由上图表格中可见，即使汤源凹陷中 6 口井的白垩系地层，有 3 口井的暗色泥岩百分比小于 6%，单层厚度小于 2.5 m。（只有 T7 井是最好的一口井，暗色泥岩百分比 53%，单层厚度 21 m。）

从地震剖面上看，含煤层 T_5 标准层以下基本没有好反射。所谓 T_g 反射层只有个别剖面上出现影子，也不一定可靠。所以断陷盆地下白垩系地层的厚度图很不可靠，参看地震剖面。所谓“预测暗色泥岩最大厚度 110 m”只是一种猜想。

井中揭露的 1300 多米的下白垩系地层中暗色泥岩只有 17～32 m，不可能生成目前这些油。

（四）对油藏的认识

目前 F4 井及 F6 井位于向斜里，其油藏剖面如图 25。两井油层高差 220 m，都未见底水，估计是柞树岗向斜全部含油。

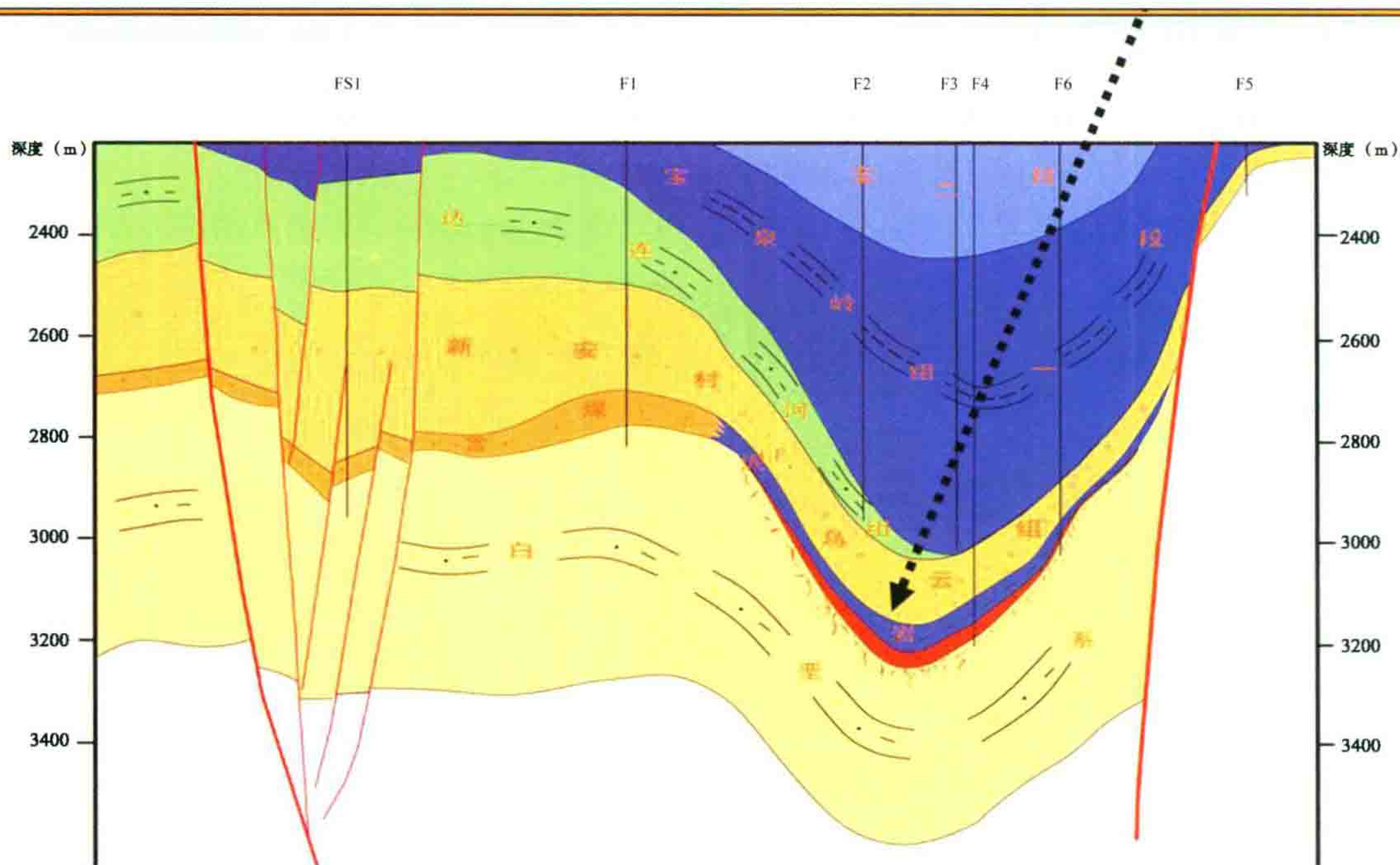


图 25 F4-6 井的油藏剖面

我同意胡少华他们对 F4 井及 F6 井油藏的认识：它们是第三系底部含煤层的泥岩封堵的岩性油田，正如图 25 中含油层（红色部分）被泥岩（深蓝色部分）所封堵。部署 F4 井及 F6 井井位时就是考虑了这泥岩的覆盖的因素。胡少华报告中说：“F1 井及 FS1 井发现了含煤层的强反射，因此，作为在向斜里部署 F6 井的依据——根据追踪第三系强反射，固然发现了 4 井及 6 井的含油层位。”

图 26 是第三系底部泥岩的分布图，F4 井及 6 井刚好被它所覆盖，形成了泥岩封盖的岩性油田。

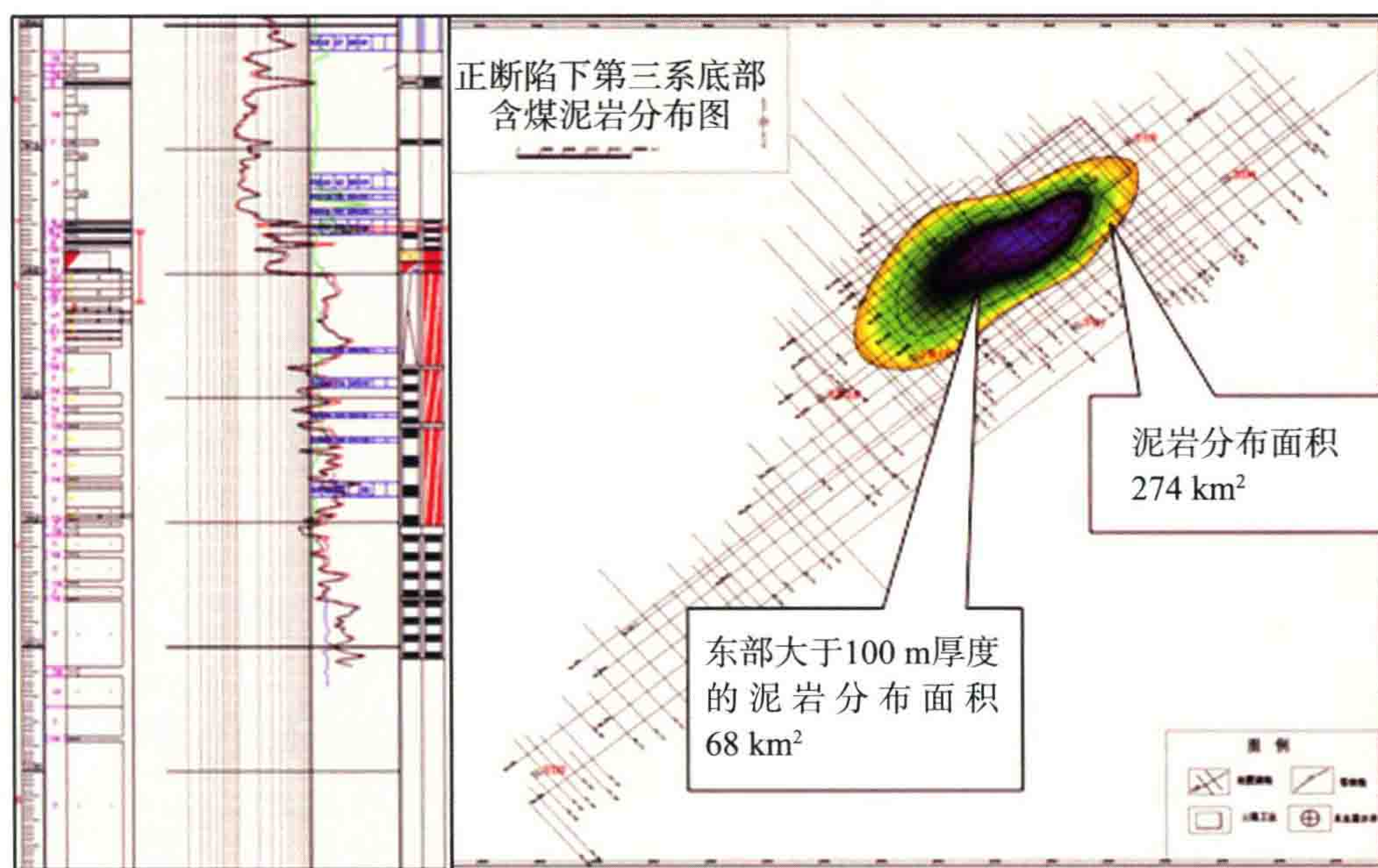


图 26　第三系底部泥岩的分布

（五）地质学家对方正断陷白垩系生油的佐证

老尖山地面油苗性质与下白垩系原油性质同源。

方正县老尖山玄武岩形成时代为中新世(陈洪洲等,1996)。该处玄武岩曾有多期喷发,在靠近中心部位,气孔中发现有油苗。有的气孔则为水和石英充填。油苗有 3 种状态,即浅黄色液体,乳黄色或浅蓝色膏状体和白色固体蜡。

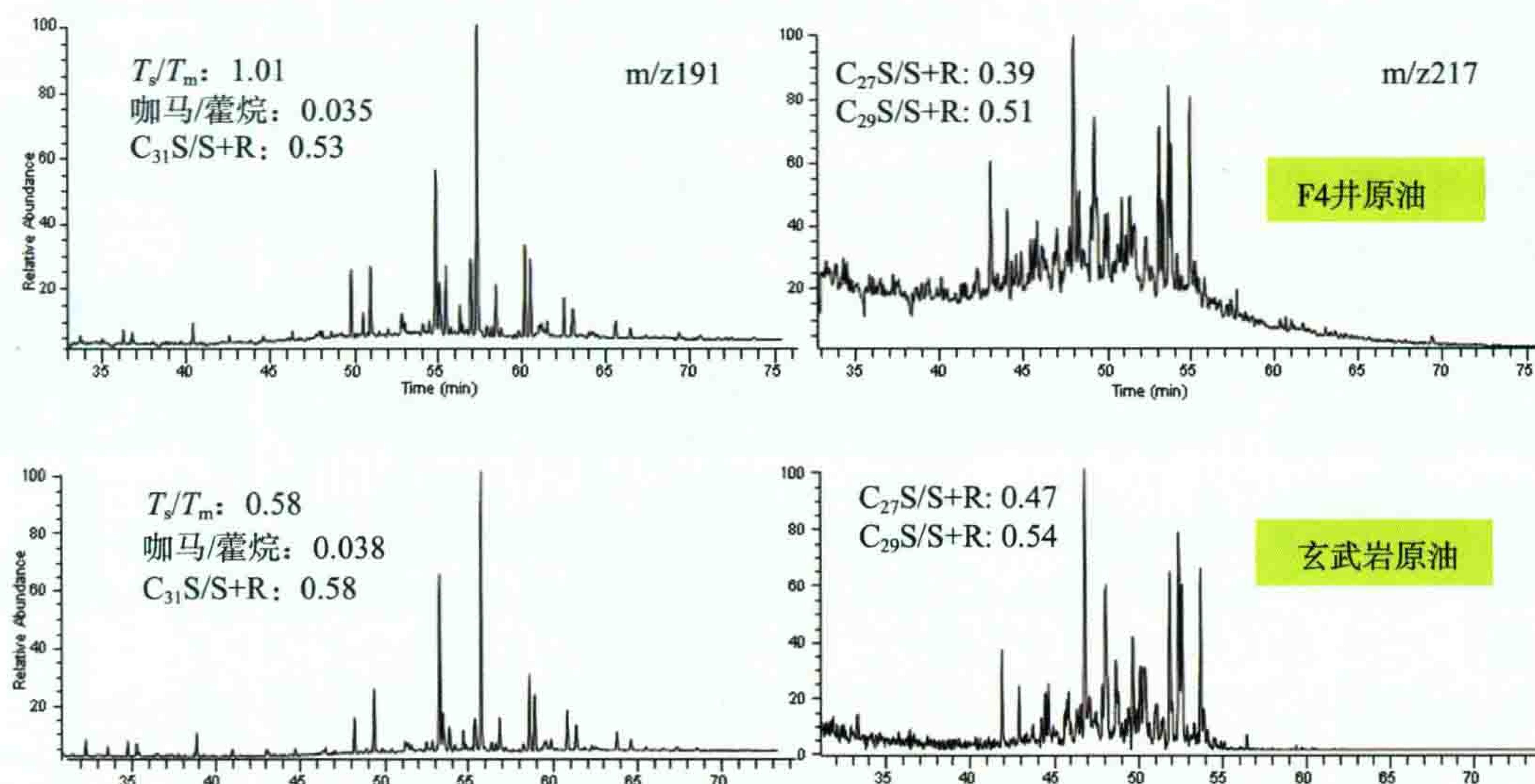


图 27　老尖山地面油苗性质与下白垩系原油性质同源

老尖山油苗与F4井油生物标志化合物基本相似，反映二者来源相同。附有原油生物标志化合物质量色谱图(图27)。

于是这里产生了问题：既然老尖山油苗的中新世的玄武岩气孔晶洞中发现有浅黄色原油，而玄武岩是从地壳中上来的，那么应该说，F4井的油是第三纪中新世所产生的。为什么说是白垩系生的油呢？更直观的判断应该是玄武岩气孔中有油，更可以证明方正断陷的原油是从地下深处，沿着大断裂带到储集层里的。

如果说原油中含有白垩系特有的标志物，那也不完全可以认定是白垩系生的油，因为石油是一种最好的溶剂，它路过白垩系，就会溶解、夹带白垩系的标志物，这是当前所谓"油源对比"中的一个误区。

所以，我偏向于原油可能来自郯庐深大断裂的深部。

三、油气成藏后能保存多久?

《石油勘探与开发》杂志2006年12月发表了中国地质大学(北京)的李明诚等所写的《油气藏的年龄》一文。该文章很值得我们一读。

以下是我摘自李明诚发表的《油气藏的年龄》一文中的主要结论性的内容，他指出以下几点。

"油气成藏后能保存多久？或者说它的年龄有多长？这既是个重要的理论问题，又是对油气勘探、评价都很有意义的问题。"

"国外学者曾对全球石油储量和大油田的年龄做过一些研究"。"Miller(1992)和Macgregor(1996)根据对全球石油储量和大油田储量的时代分布进行了研究，估算出它们的平均中值年龄分别为29 Ma和35 Ma，平均生存年龄分别为41 Ma和55 Ma。**提出自然年龄的概念，即单纯由微渗漏和分子扩散作用造成油气藏(田)消亡的时间，并估算出大、中型气田和油田的平均自然年龄分别为70 Ma和120 Ma。无论是平均生存年龄还是平均自然年龄，相对于地质历史时期都很短暂。**因此，古生代形成的油气藏(田)要在地史过程中保存下来，必须不断有烃源补给，或是具备各种晚期成藏的条件，诸如烃源岩晚成熟、构造圈闭晚定型以及次生油气藏的形成等等。"

(一)中值年龄(半衰期)

1. Miller的研究

Miller(1992，1996)对全球石油储量的时代分布和中值年龄进行了研究。**他认为，石油在不断生成，同时又在不断遭到破坏，因而石油的储量也应遵守自然衰减定律，即随时间呈指数递减，类似于放射性衰减，因此石油储量也有半衰期。**

Miller根据全球的石油储量及其生油时代，直接确定了全球石油储量的半衰期。**他从最年轻的石油储量开始，**依次统计了占全球石油50%、25%和12.5%储量的年代范围，这样的一个百分比和年代范围就代表了一个半衰期。结果3个最年轻的半衰期很近似，分别为28.6 Ma、25.8 Ma、31.3 Ma，平均为29 Ma(图28最右边3根柱子)。*

* 这3个最年轻的石油储量已经占全球石油储量的绝大部分。

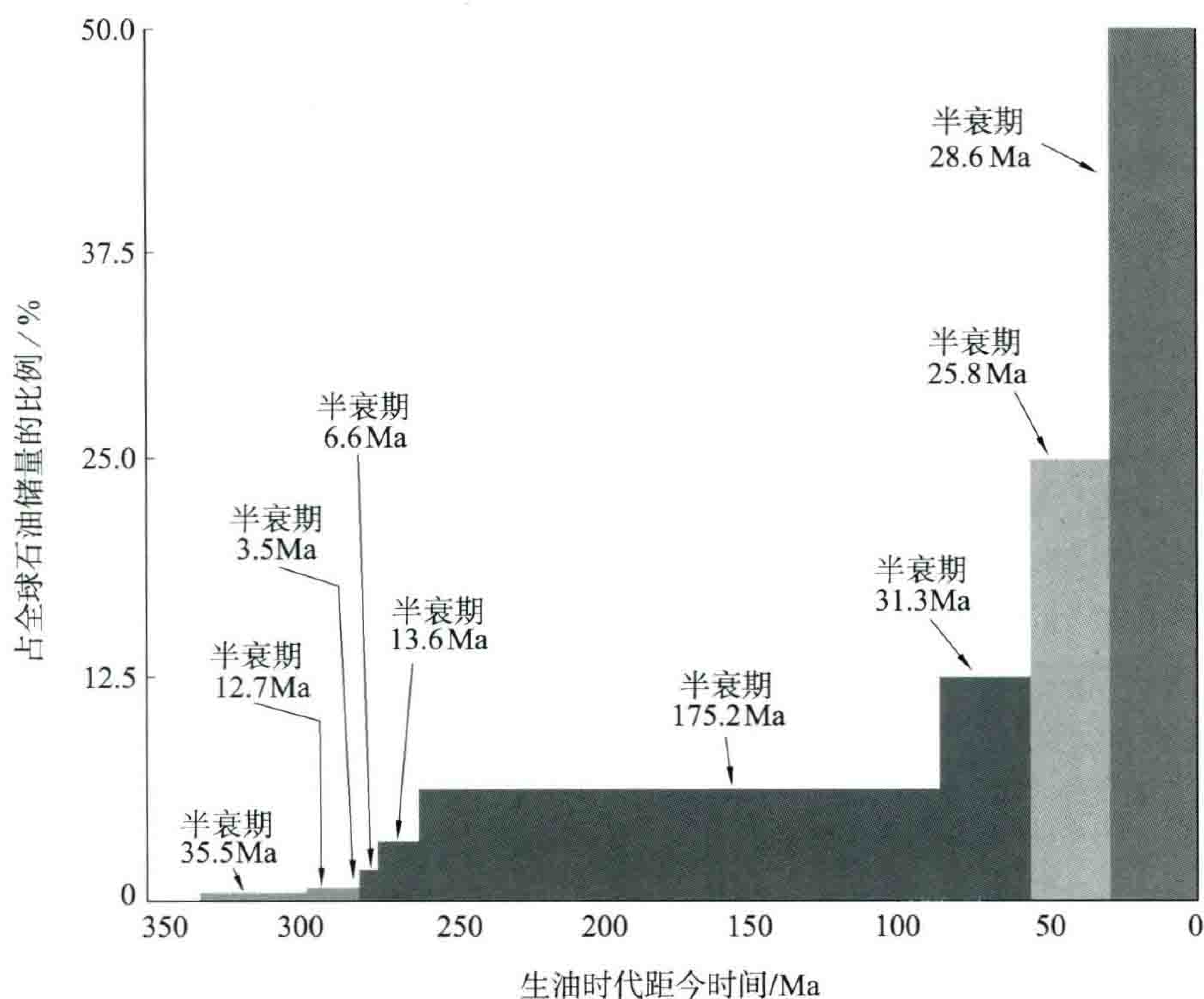


图 28 全球石油储量的 9 个半衰期(据 Miller,1992)

Miller 认为:全球石油总储量在 1 Ma 中基本保持稳定,即在此期间全球石油的生成速度等于其自然破坏的速度;在此前提下,全球石油储量与其半衰期和流量(充注或漏失量)有如下关系:

半衰期×系统流量(充注或漏失量)=ln2×系统规模

式中的系统可以大到全球范围,也可以小到某一油田,只要获得式中相应的参数,就可以求得半衰期(中值年龄)或系统中的石油储量。该模型也适用于天然气,只是天然气系统方面的参数目前还不易确定。

此外,Miller 研究认为,**全球石油储量的最小渗漏速率约为 11.4×10^4 t/a。若以全球地下石油储量为约 47000×10^8 t 计算,它们将在约 41 Ma 内渗漏殆尽,那么 41 Ma 则可理解为油藏的平均生存年龄。**

2. Macgregor 的研究

Macgregor(1996)根据全球 350 个大油田的地质储量和时代分布认为:占世界 80%以上的石油地质储量在距今 75 Ma 时就已成藏,其中值年龄为 35 Ma(与 Miller 所提 29 Ma 大体相当);这表明世界现有大油田的一半在距今 35 Ma(渐新世)之后形成(图 29)。**又据 Macgregor 的研究,大油田的垂向渗漏速率约为 1.4×10^4～5.7×10^4 t/a,以此计算全球 350 个大油田的地质储量约为 10000×10^8 t,可在 18～72 Ma 内渗漏殆尽。**

实际上,由于含油气盆地和圈闭的类型不同,石油的渗漏速率和聚集速率都有很大不同,因此它们的中值年龄和生存年龄也必然有所不同(表 1),按此估算其平均生存年龄为 55 Ma。

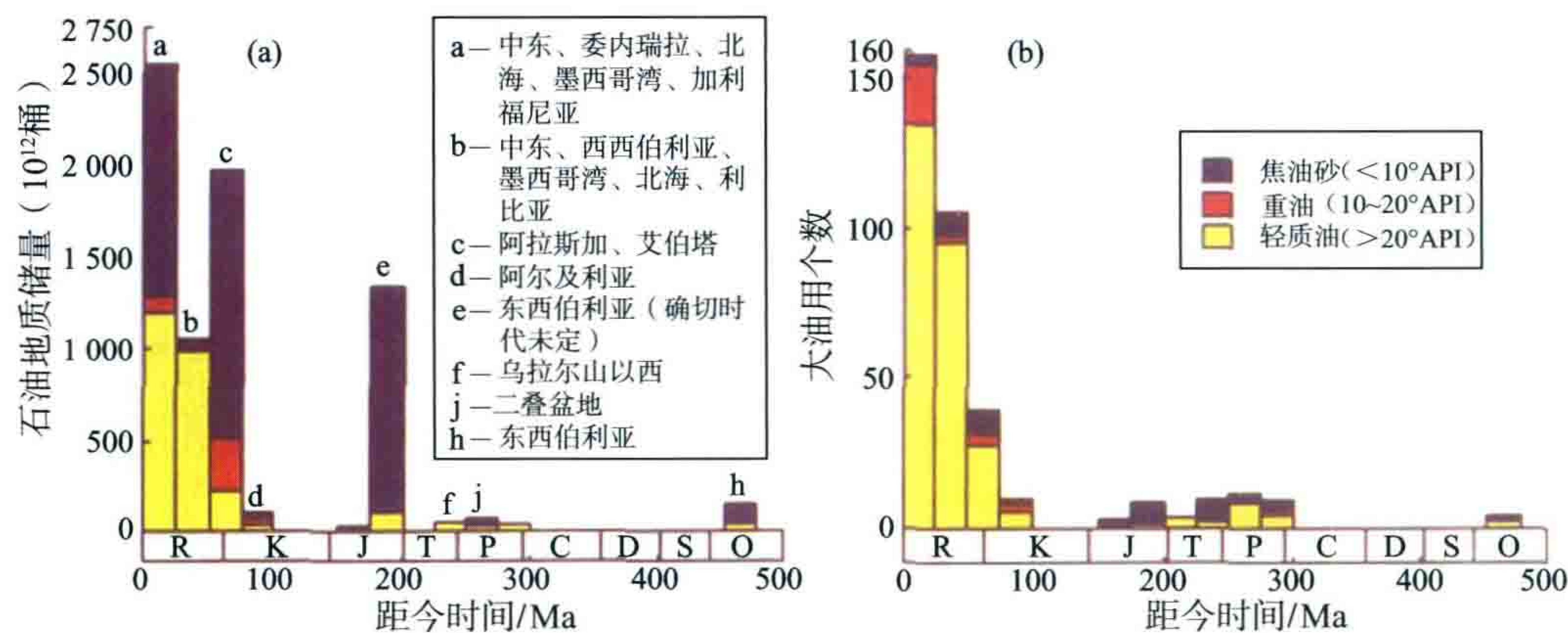


图 29　全球大油田的地质储量(a)和数量(b)与石油聚集定位年龄的关系

表 1　估算全球 350 个大油田中不同圈闭类型的中值年龄和生存年龄

圈闭类型	所属圈闭	油田数	中值年龄/Ma	生存年龄/Ma
张性断块	掀斜断块	44	<25	<25
底辟	泥底辟、盐底辟	8	<25	<25
挤压背斜	冲断背斜、逆断背斜、不对称的陡背斜	97	<25	<25
低幅度背斜	披覆背斜、盐隆、滚动背斜	136	40	40
地层岩性	深水扇-河道砂体、生物礁、裂缝性碳酸盐岩圈闭	21	60	75
上倾尖灭	碎屑岩楔状体、超覆圈闭、不整合圈闭	35	60	110
所有油田	包括以上类型圈闭和其他类型的圈闭及超重油砂	350	35	55

（二）自然年龄（理论消亡年龄）

“无论是 Miller(1992)还是 Macgregor(1996)，都是根据现有油田的储量和时代分布来研究它们的中值年龄和生存年龄。但现有石油储量与时代分布的关系都是历经了各种地质破坏作用后的结果，因此本文《油气藏的年龄》认为，目前统计和估算出的中值年龄和生存年龄可以说是全球油藏（田）遭到破坏而消亡的年龄。尽管自然界中不存在没有遭受任何地质破坏的油气藏（田），但从理论上可以认为即使其存在，它们也无时无刻不在经历着油气因盖层的微渗漏和天然气分子扩散等作用而自然消亡的过程。**本文（《油气藏的年龄》）把单纯由微渗漏和分子扩散造成油气藏（田）消亡的时间称之为油气藏的自然年龄或理论年龄。显然，自然年龄一定比目前统计估算出的中值年龄和生存年龄要长得多，可以作为油气藏（田）保存时间的上限值。**”

1. 天然气藏（田）的自然年龄

“Smith 等(1971)研究了全美国的气藏，确定天然气通过 150 m 厚页岩盖层的平均扩散速率为 1.9 $m^3/(km^2 \cdot a)$；Leythaeuser 等(1982)、Krooss 等(1992)和 Nelson 等(1992)通过对荷兰的 Harlingen 气田的研究，确定天然气通过 390 m 厚页岩盖层的平均扩散速率为 3.7 $m^3/(km^2 \cdot a)$；Montel 等(1993)通过对北海气田的研究，得出天然气通过由石膏、粉砂岩和石灰岩组成的 550 m 厚盖层的平均扩散速率为 10 $m^3/(km^2 \cdot a)$。

本文(《油气藏的年龄》)取上述扩散速率的平均值 5 $m^3/(km^2 \cdot a)$为天然气自然的扩散速率，来计算天然气藏(田)的自然年龄。

对于一个含气面积为 50 km^2、地质储量为 300×10^8 m^3 的中型气田，若以 5 $m^3/(km^2 \cdot a)$为自然扩散

速率，则在 1 Ma 中将因扩散散失 250×10^6 m^3 天然气，那么该气田的天然气将在 120 Ma 中散失殆尽。天然气藏（田）除分子扩散外还有微渗漏的散失。天然气在无破裂泥质盖层中的渗流速率与扩散速率大体相当，再加上渗流散失，则一个中型气田可以在 60 Ma 中完全破坏消亡。同理，对于一个含气面积 120 km^2、地质储量为 1000 亿 m^3 的大型气田，则将在 80 Ma 中完全散失消亡。可见，一个大、中型气田的自然年龄分别约为 80 Ma 和 60 Ma，平均为 70 Ma。”

2. 油藏（田）的自然年龄

“（李明诚等）利用达西公式近似计算了原油通过盖层的微渗漏量。若取地下原油的黏度为 5 mPa·s、密度为 800 kg/m^3，当其通过厚 150 m、有效渗透率为 1×10^{-10} D、有效渗漏通道占 10%的泥质盖层，两边压力梯度为 1 kPa/m 时，其平均渗流速率为 0.006 t/(km^2·a)。若以此值为石油的自然渗漏速率，那么一个含油面积为 50 km^2、地质储量为 3000×10^4 t 的中型油田将在 100 Ma 中渗漏殆尽；同理，一个含油面积为 120 km^2、地质储量为 10^8 t 的大油田则将在 140 Ma 中完全渗漏消亡。可见，一个大、中型油田的自然年龄分别约为 140 Ma 和 100 Ma，平均为 120 Ma。

“尽管在参数取值、油气微渗漏和扩散的速率以及含油气面积与储量的统计关系等诸多方面，上述计算都存在较大的不确定性，其结果也只能是一个很粗略的估算值；但仍可以建立起一个初步的概念，那就是一个大、中型的气田和油田的平均自然年龄分别为 70 Ma 和 120 Ma，远远大于实际的全球石油储量和大油田的平均生存年龄 41 Ma 和 55 Ma。”

四、哈得逊倾斜油田

《石油勘探与开发》杂志 2009 年 2 月刊登了孙龙德、江同文、徐汉林等编写的《塔里木盆地哈得逊油田非稳态油藏》一文。文章先用古构造分析了油藏的发育史，又用物理油藏模拟证实了个倾斜的油田的平衡过程。

哈得逊油田位于塔里木盆地中部，是石炭系东河砂岩的一个大油田，储量约 10^8 t。

（1）石炭系东河砂岩哈得逊油田的南北向今构造油藏剖面如图 30。其中标红色的含油层位明显呈倾斜状，高差达 120 m，而且油水界面也不整齐。这是一个奇特的油田。

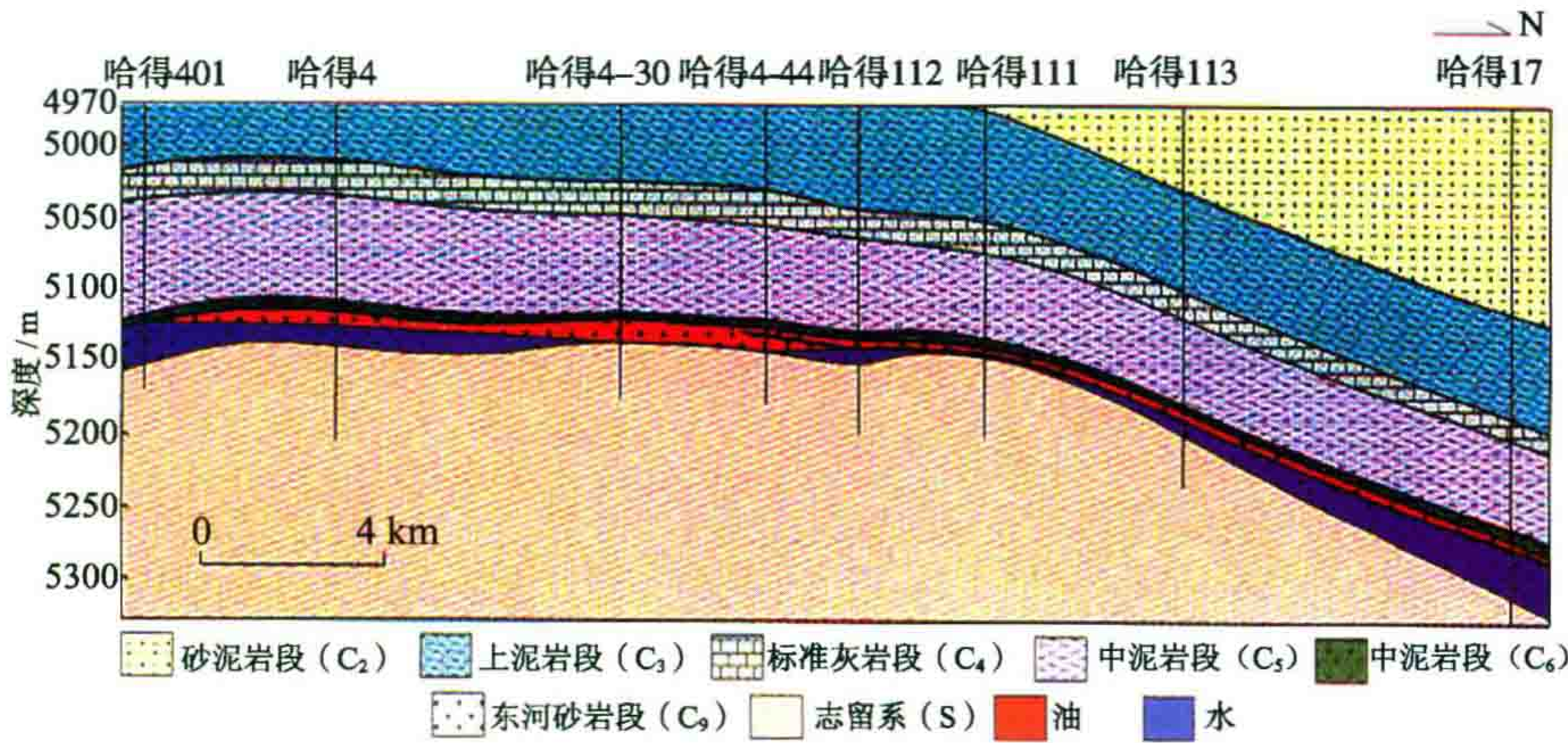


图 30 哈得逊油田石炭系东河砂岩油藏剖面图

（2）采用古构造发育史研究手段，得到如下结果，如图 31。

6 Ma 年前，第四系库车组沉积期，东河砂岩是北高南低。后来南面抬高，北面沉降。到现今变成南高北低。

图 31　哈得逊油田东河砂岩油藏库车组沉积期(距今 6 Ma)至今构造演化图

(3) 利用相似性原理，采用物理模拟的方法所作的古油藏调整平衡过程的试验，结果见图 32。图中还指示了含油饱和度在平衡过程中的变化。并推断再过 3 Ma 就可以达到平衡。

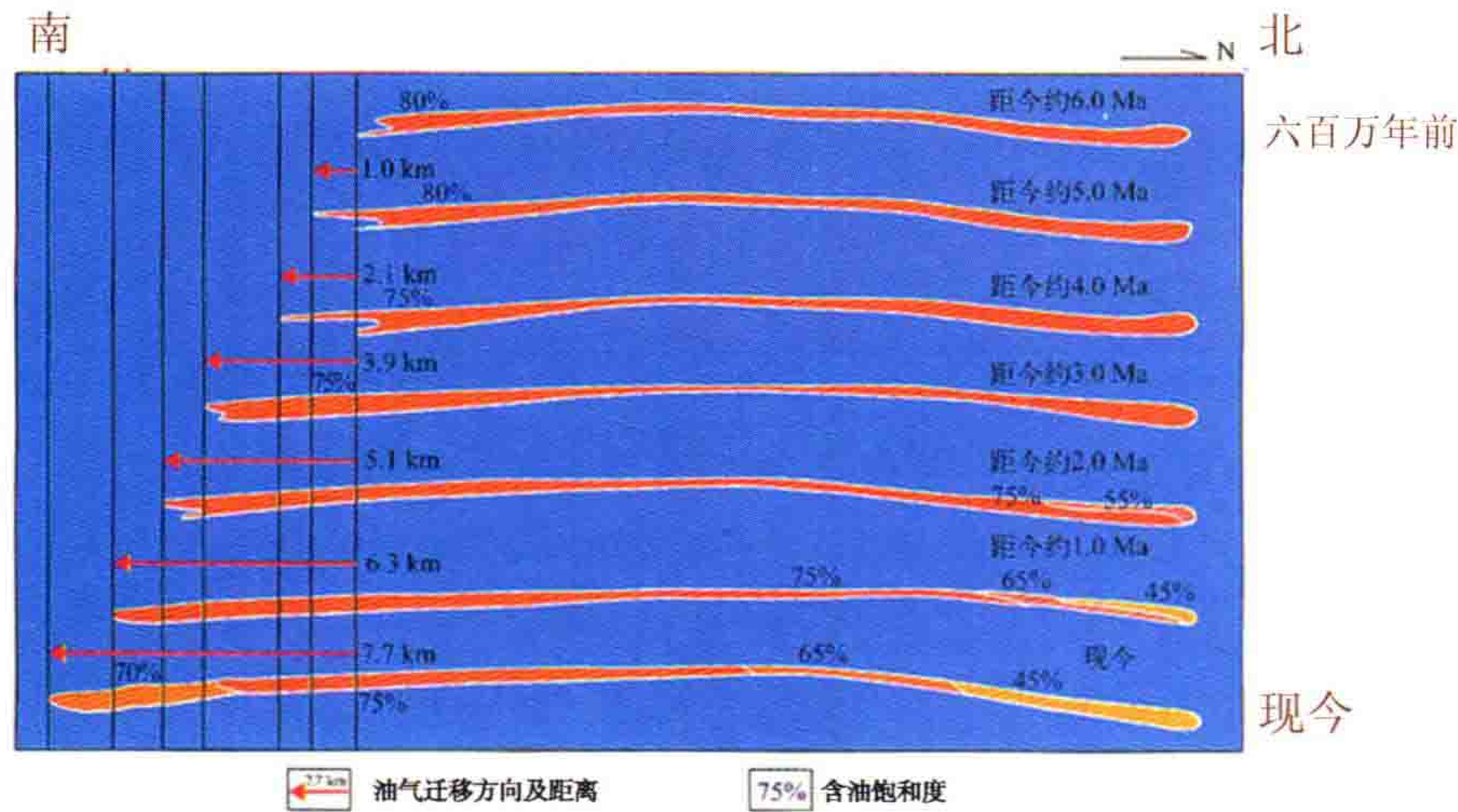


图 32　油藏的物理模拟

(4) 油藏发现过程。

哈得逊油田原来根据地震构造图(如图 33 中黑色等高线),只知道构造高点在南面(粉红色区)。后来才知道该油藏是非稳态的倾斜油田,倾斜幅度达 120 m,于是向北发现还有大片含油面积(深红色区),见图 33 倾斜油田的含油范围。

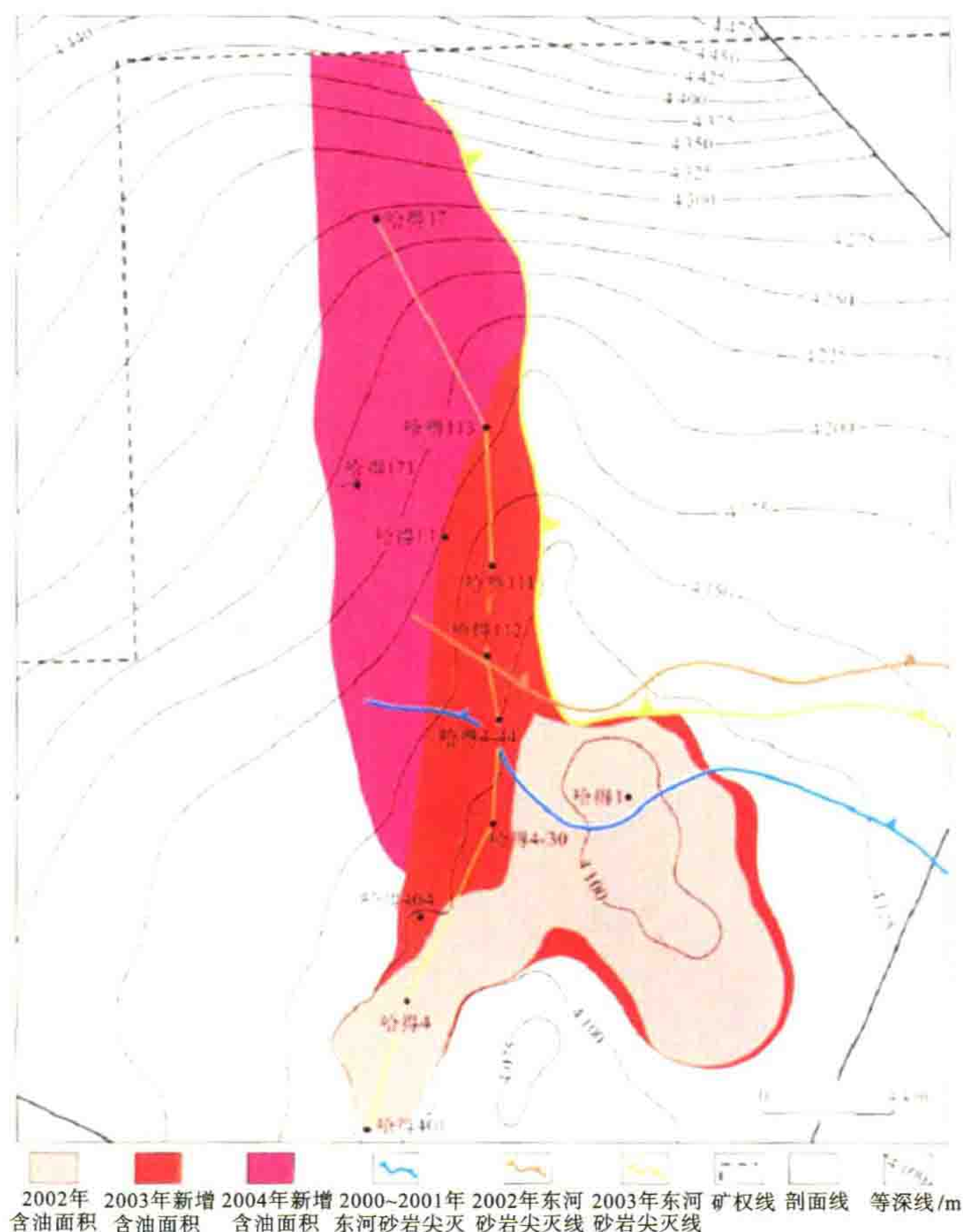


图 33　倾斜油田的含油范围

(5) 主要结论。

一个非稳态的油藏处于倾斜的背景里,它经过 6 Ma 年,就能够达到平衡。

6 Ma 年对于地质发展过程来说是很短暂的一瞬间。是第四系库车组沉积的喜马拉雅运动的最后一期的产物。大家知道:恐龙灭绝于白垩纪末,距今约 100 Ma,6 Ma 年只是它的 6%。

因此,主要结论如下。

① 油藏的变化是很快的,新构造运动起着重要的作用。

② 油藏的平衡速度也是很快的, 只有几百万年。

③ 目前找到的油气田绝大部分是已经达到平衡。哈得逊油田是少数的例外。当然,如果把每个油田都看成是处于不断漏失又不断充注的平衡过程,则这个油田也不奇怪。

④ 所以寻找油气的方法中,研究今构造成为找油的主要手段。我们地震勘探的基础就在于此。否则地震勘探不会像今天这样重要。我国目前找到的油气储量油 90%以上是依靠物探(主要是地震勘探)所发现的。而其中绝大部分是由今构造决定的,也就是现今油气绝大部分是已经调整到差不多了。油气已经装满到“溢出点”了。哈得逊油田是少数的例外,这个例外也给了我们研究非稳态油藏的运动速度提供了很好的例子。

⑤ 我在《打破思想禁锢,重新审视生油理论》的第 10 节中曾提到“大庆油田油水过渡带尚处于水动力学的非平衡状态”。在大庆油田的开发过程初期,就发现油层下部的油水过渡带的底界不是平的。长垣西

侧其海拔为−1250 m，而东侧却为−1220 m，相差30 m，尚处于水动力学的非平衡状态，没有人解释清楚这种现象。其实在大庆长垣的西侧有一条南北向的基底断裂，我认为是西侧断层在近代还在不断向上补充油源，造成了油水过渡带西深东浅的非平衡状态。它说明了地下原油至今还在不断往上补充、运移。因此，大庆油田是另一个例子。

五、新构造运动对油气藏形成的作用

中海油的龚再升老总2005年发表的文章《中国近海新生代盆地至今仍然是油气成藏的活跃期》对中新世末(5.3 Ma)至今的新构造运动对油气藏形成的作用作出了多方面的论述，值得大家一读。

关于我在《打破思想禁锢，重新审视生油理论》文章22个问题中的第9节里，我提到墨西哥湾深海区块330油田OS油层由莫比尔、德士古、雪弗龙等公司合作进行强化开采。1972年以来，共采出数亿桶天然气及凝析油！人们发现油质逐渐变轻，生物降解程度愈来愈少的奇怪现象。

龚再升对它进行了大量调研，详尽地写了如下一长段文字。

尤金岛(Eugene island)油田研究证明，至今有来自深层的油气补给。众所周知的美国墨西哥湾尤金岛330区块油气开采中的特殊地质现象，给人们提出了问题，而且经过美国康奈尔、德克萨斯州A&M大学、路易斯安那州立大学、哥伦比亚大学拉蒙特-多尔蒂地球观测中心等大学和研究机构的众多科学家，在美国能源部及大油公司的支持下，做了10多年的深入研究，取得了一些重要的认识。

(一) 油田形成于更新世

位于路易斯安那湾岸区的尤金岛330区块，是世界上最有生产能力的油、气田之一。该油田是同沉积生长断层上的滚动背斜，生长断层的活跃期是早更新世(2.1 Ma)到现在，圈闭的主要形成期是更新世(1.8 Ma)，主要产层是更新统，储层埋深1311～3658 m，水深64～81 m。从海底微小烃泉、海底沉积物取样，对轻烃组分和二甲苯芳烃结构等地化分析也表明，流体至今正在沿着生长断裂运移。

(二) 源源不断的新油气补给

据《Geotimes》墨西哥湾油气藏的补给一文中指出，该油田于1971年发现以来，至1997年底已产出了10×10^8多桶油。产出油气已大大超过当时预计的可采储量4880×10^4 m^3(裴宗成等《美国墨西哥湾沿岸盆地大中型天然气田形成条件调研报告》)，产量的递降速度要比预料的缓慢得多。生产实践表明，本区块一直存在源源不断的新油气补给。对同一口井连续16年取样分析研究也发现，油气组分随着时间的推移也发生了变化，组分的显著变化，是在为期3～10年的短暂时间内才发生的。C_7烃组分中的特殊变化表明，这些烃都是近期从越来越深而温度又越来越高的层段运移来的。

(三) 新补给的油气是新生成的

研究结果还表明，新运移到330区块中的油气，其地质年代比目前在生产层中所发现的油、气或水的年代还要晚得多，都是近代生成的。经年龄测定，原先产层中油气水的年龄至少为0.3×10^8～1.46×10^8 a。该区块的烃源岩，为10^8～2×10^8 a。而新补给的油气则年龄不到200×10^4 a。

(四) 油气沿断裂运移是周期性的

1993年，试图从被解释为继续补给油气的通道——雷德生长断层上直接开采石油，钻探了Pathfinder井，结果并未取得成功。Pathfinder井只采出了少量油，该断层就被封闭起来，可能是由于钻井所引起的压力下降造成的。然而，大量井底压力测量结果证明，当井底压力稍有增加，就可使周围沉积层内的整个裂缝系统打开，又可使流体流动。其周期性的压力变化，可能解释C_7组分迅速变化的原因。

（五）生烃增压可能成为油气运移的动力

研究结果还指出，活跃的、快速的盆地沉降，使深层正生成油气，生烃产生的压力足以使裂缝系统周期性地打开，可使甲烷等流体连同所携带的油一道向上运移，甚至强烈地向海底渗透喷射。

尤金岛330区块的地质现象和认识对“新构造运动控制油气晚期成藏”的观点是一个很好的证明，也是一个启发。这种现象，不仅出现在墨西哥湾，同样在中国近海第三纪含油气盆地中存在。

接着龚再升论证了中国近海第四纪构造断裂活动与油气活动共生关系，节录如下。

1. 近海含油气盆地第四纪构造运动比较活跃

第四纪断裂伴随着油气逸散：在渤海PL19-3海底工程地震调查中，发现大量密集的垂直裂隙、断裂，直通海底，断裂间距100 m、300 m、500 m不等。沿着这些断裂不同程度存在着天然气的逸散，在浅层地震剖面中，沿断裂存在着气烟窗通道，据测量仅PL19-3油田顶部，这种在地震剖面上可识别的天然气逸散区面积达14 km^2，**而大油田就在下面**。

2. 渤海PL19-3油田形成于第四纪

PL19-3油田就是典型的晚期油气成藏的实例。这个油田位于渤南隆起的北倾没部位，本来是一个北倾披覆鼻状构造，上新世以来，郯庐断裂右旋走滑挤压，东翼抬高，南翼下降，形成披复-挤压的PL19-3大背斜构造，该油田圈闭是上新世以来开始产生，至第四纪定型，才最终形成现在的大油田。如前所述，这个油田至今仍有大量油气沿着断裂向海底逸散，而油田仍保存巨大储量，更可证明这个油田自成藏以来至今，一直有来自深部的油气补给。在成藏的地质历史期至今，油田一直处于供聚大于逸散的动态平衡之中。

3. 莺歌海DF1-1气田也形成于第四纪

DF1-1气田无疑是晚期成藏气田。通过对地震剖面层拉平的分析，天然气也是在上新世至第四纪才充注成藏。从气藏地震剖面可以看到，气层以上地层中，有大量的垂直裂隙，也在持续的向海底散失着天然气，要保持这个千亿立方米的大气田，同样是供聚大于逸散的动平衡成藏。

龚再升文章第三段又列举地震曾引起南海油气井产量和压力变化；台湾车笼埔大地震引起莺歌海底辟带放气等现象。从而提出如下观点：天然地震是地球能量释放的主要形式；含油气区地震与断裂构造耦合可能促成油气运移。

以上是直接引用龚再升的文章，我十分同意他的观点。我在《打破思想禁锢，重新审视生油理论》文章中就强调了**“每个油气藏都处于不断漏失，并且不断补充的动态平衡过程中”，“今天有机生油论者所计算的生油量是远远不够漏失的”**。

六、我的判断和二元论指导找油

纵观以上几节我写的和引用的这些文章，把它们连贯起来加以思考，我们可以清晰地意识到以下几点。

（1）本文第1部分《桩海-埕北花岗岩油藏是从哪里来的油》及第2部分《方正断陷的油气来自何方?》的内容，我们可以判断油气最可能来自深部。

（2）参考本文第3部分《油气藏的年龄》，我们认识到：“每个油气藏都处于不断漏失，并且不断补充的动平衡过程中”。在图28中，当今世界大油田的年龄都不超过75 Ma。

（3）参考本文第4部分《哈得逊倾斜油田》，我们可以得到“油田调整平衡的速度相当快”的概念。只需几个百万年。

（4）参考龚再升这篇文章，我们认识到：“新构造运动对这个动态平衡起着最关键的作用”。今构造基本决定了绝大多数油田的状态。**而且当今世界上的绝大多数油田在圈闭中的充注程度都已经达到今构造**

的“溢出点”。

(5) 为什么当前用地震勘探寻找石油的手段那么有效？我看靠的是“今构造基本决定了油气藏的形态和位置”。

(6) 总结以上的观点，使人感到现有的“有机生油的源控论”与以上的几点认识有些格格不入。地球上所有的油气田都经历着迅速的动态变化之中：有漏失，有补充，有转移，有消亡。那么为什么油藏还在“油源”附近不动呢？其实目前有机生油理论计算出来的“生油量”还远远不够“漏失量”。

最后我再强调以下几个观点。

(1) 时至今日，在实验室中**没有人在 50℃～100℃ 的温度范围里证明过 C_{10} 以上的石油成分能够生成。**大庆油田的地温只有 60℃，俄罗斯的乌拉尔油田的地温只有 40℃。因此，有机生油理论它只能称作是一种“学说”，它并没有被理论证实。相反，人工合成石油的费-托反应已经是工业界使用的技术。而地幔的软流层中是合成石油的天然实验室，那里的温度压力及流体成分几个条件是能够足以产生石油的。这便是石油无机生油的理论依据。

(2) 当然，我们还不能说目前的生油理论完全没有用处。我承认所谓有机生油论的各种指标，虽然在客观上的确能够指导找油的实践，但它（不管是陆相生油还是海相生油理论）本身可能是错的。其实质是**有机碳 C 与氯仿沥青 A 的丰度实际上只是起到了与油气苗相类似的找油直接指示作用，而暗色泥岩厚度及还原指标实际上是一种盖层指标。“源控论”之所以被“有机生油”理论者普遍接受的原因却只是“油气田离不开好盖层和一个还原环境”而已。**

(3) 今后我们至少应该用“二元论”来指导寻找油气。

关于石油生成的理论的争论由来已久，至今还没有形成共识。希望今后随着资料的积累，问题会慢慢得到澄清。在我们还没有得到共识的今天，我想至少应该采取用“二元论”来指导寻找油气的态度。

图 34 是我表达的用“二元论”来指导寻找油气的示意图。蓝色椭圆形中的内容是我们已经发现的油气田，它们位于深黄色的所谓“油源层”烃源岩附近。图下面所绘的是用“二元论”来指导寻找油气的 4 个方向。

① 在已知油田的深部寻找油气。如大庆油田深层的扶余、杨大城子、登娄库油层都已经见到油，并且在大庆油田南部还连片含油，可以找到相当规模的油气。胜利油田的埕北地区还应继续到深部寻找古生界及沿大断层的花岗岩含油气带。从 CB30 井到 ZG10-3 井，太古界花岗岩是北高南低的产状。有 5 条近东西向的断层及一组近南北向的基底断层把它分割开来。我认为北面 CB30 井附近花岗岩埋藏更浅，应该更有利。但因为花岗岩出油靠的是裂缝，所以关键是布井时不要追求打 T_gA 的构造高点，而应该把井往大断层上打，才能高产稳产。我国其他油田到深部找油，一定也还会有所收获。

② 继续在古潜山找油。有些古潜山不被地质家看好，认为离开“生油凹陷”太远了。青海柴达木的油南重力高，改进了的地震剖面上已经隐约可见到下面有巨大的花岗岩隆起。此处 YS1 井第三系地层都以泥岩为主，泥岩中油气显示不断，就是缺乏好的储层。我认为下面的花岗岩风化壳应该是一个大油田。英雄岭范围的 3～4 个巨大的基底隆起都应该是很有希望的，参看图 35 及图 36。

③ 到断裂带附近去找油。郯庐大断裂中的新生界凹子都可以找到油田。方正凹陷已经得到证实。塔里木盆地的玛札塔克大断裂长 300 km，在其东段和田河附近找到了和田河气田。产气层是石炭及奥陶系灰岩。这个气田的西面，在色力布亚到麦盖提一带是一个含油地带。这里是今后寻找黑油的良好场所。塔里木西北的吐木休克断裂及温宿大断裂带也是有勘探价值的。

④ 在远离“油源层”的地方找油。只要有盖层，有圈闭。就可以列为勘探对象。流花油田就是一个例子。塔东地区也值得继续勘探。

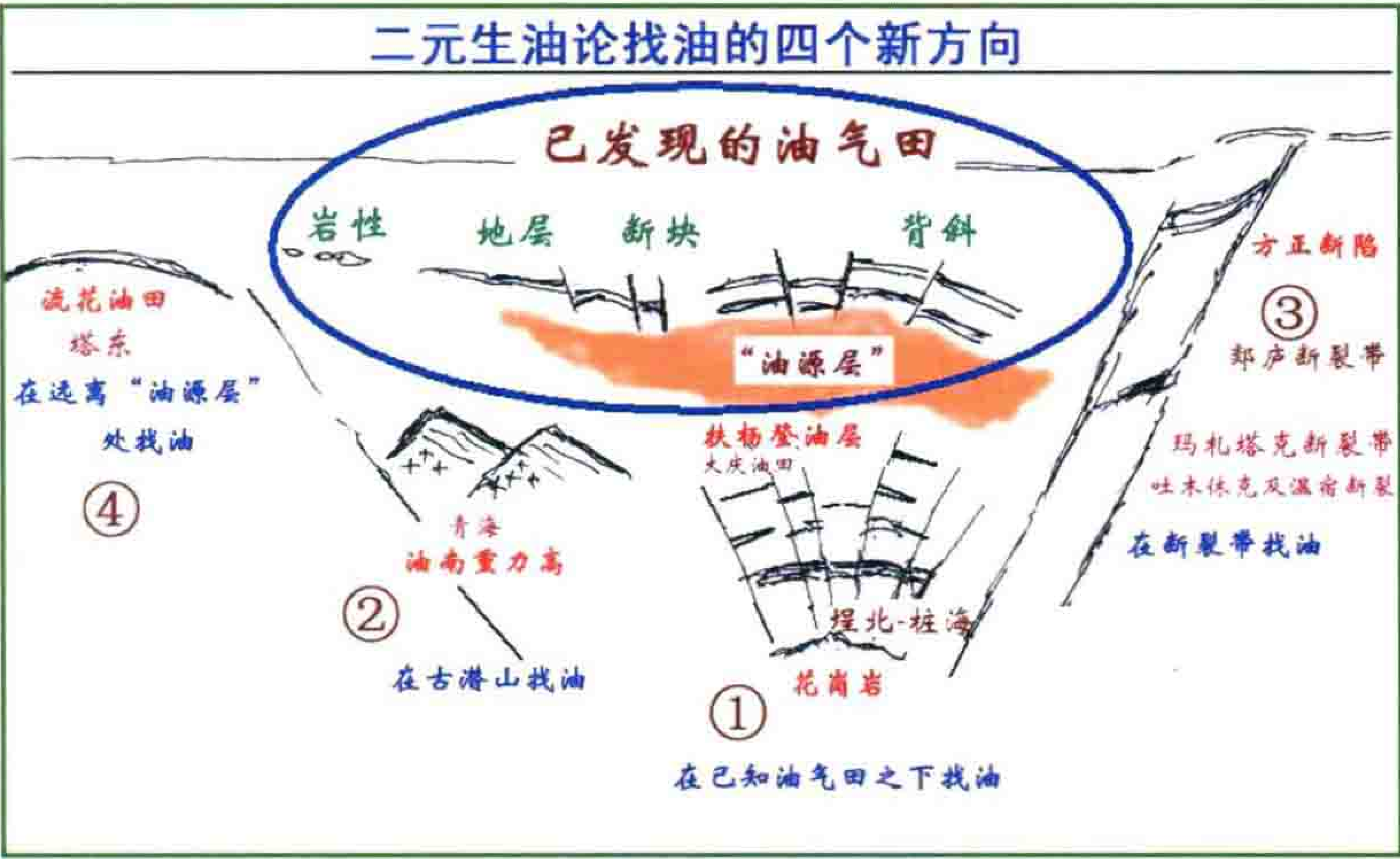


图 34　用"二元论"来指导寻找油气的示意图

附青海英雄岭的重力异常图和地震剖面。我认为是大有希望的勘探对象。地震剖面是过去的二维测线，资料不够好。今后作三维改进后，我相信花岗岩里应该有个大油田。

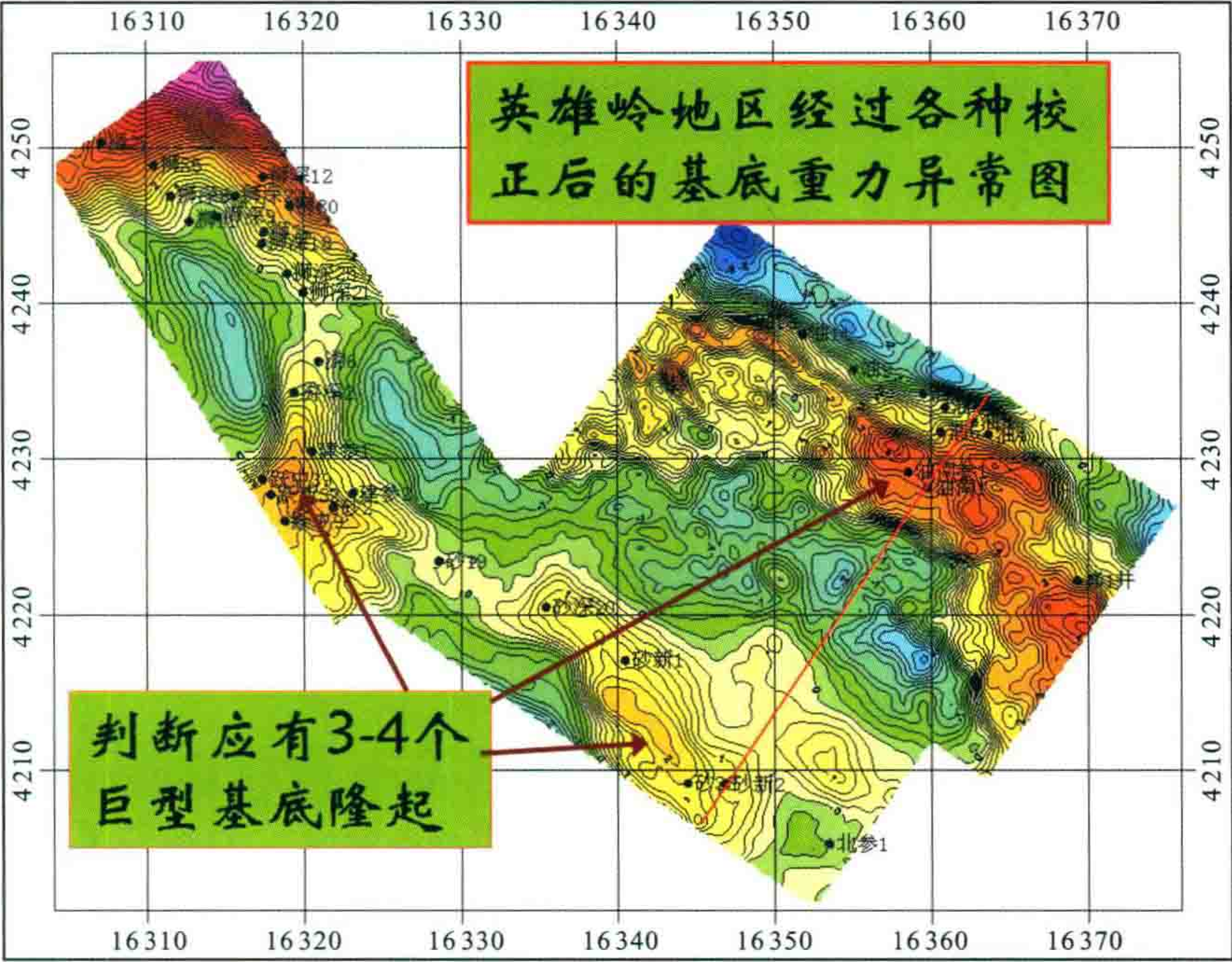


图 35　重力异常图表示英雄岭地区还有多个花岗岩潜山

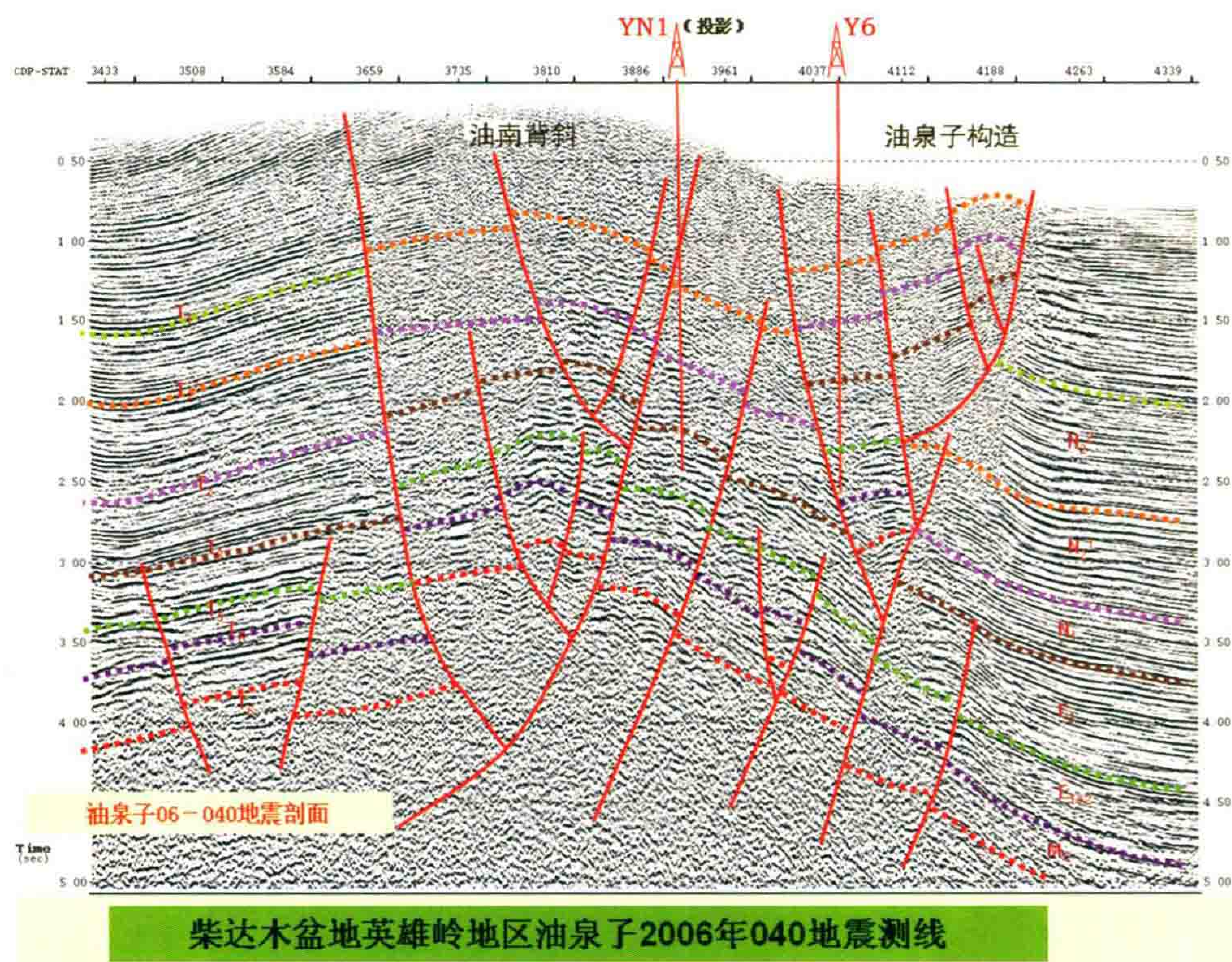


图 36 英雄岭油南构造深层有花岗岩潜山

参考文献

[1] 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 3 版. 北京:石油工业出版社,2004.

[2] MILLER R G. Estimation of global petroleum resources and their exploitation time [J]. Science and Technology Development in Petroleum Geology,2000(4):19-34.

[3] MACUREGOR D C. Factors controlling the destruction or preservation of giant light oil field [J]. Petroleum Geoscience,1996(2):197-217.

[4] 李明诚,马成华,胡国艺,等. 油气藏的年龄[J]. 石油勘探与开发. 2006,33(6):653-656.

[5] 孙龙德,江同文,徐汉林,等. 塔里木盆地哈得逊油田非稳态油藏[J]. 石油勘探与开发,2009,36(1):62-67.

[6] 陈洪洲,任锦章,徐亚勤. 依兰-伊通裂谷火山活动与地震活动[J]. 东北地震研究,1996,12(1):8-18.

[7] 龚再升. 中国近海新生代盆地至今仍然是油气成藏的活跃期[J]. 石油学报,2005,26(6):1-6.

文章编号 304-1



圈闭分析技术

——寻找油气的新手段

这又是一篇我“班门弄斧”的作品。

我不是地质学家,但是感到石油地质的基本理论中的“圈闭”理论存在问题。国外普遍流行的油气评价表中,对圈闭的打分方法是圈闭面积和隆起幅度,这是很片面的。对断块圈闭更是说不清了,如果断块面积大了,解释人员保守一点,就把圈闭等高线向上提。断块面积小了,就尽量上报圈闭面积大一些。此文中我列举了不结合构造与岩性使勘探失败的例子。

我意识到圈闭一词应该提高到“圈闭量”的含义上。而圈闭量不能光考虑构造因素,还与岩性柱子有关。只有构造加岩性两方面相结合,才能定义“圈闭”的概念。



1986 年,我尝试了对断层的封堵系数、储集系数作某种计算,探讨了一维与二维空间的封堵量计算方法,从而对断块油田的“圈闭概念”有了新的认识,并在此基础上总结出“一图一井分析方法”。尝试应用在东营、广利和荆丘油田,得到了很好的地质效果。

此文中的“一图一井法”基本是二维的圈闭分析方法。只适合于对付简单断块构造。下面文章 304-3 将圈闭分析方法发展到三维,取得更可靠的结果。

前言

本文是作者在 20 世纪 80 年代所写的稿件,由于篇幅较长,一直未能在油气杂志上刊登。然而时至今日,它所讨论的内容仍然有着现实的意义。希望它所表达的“圈闭概念”,能给石油勘探工作者一种新的启示。

“圈闭概念”是石油地质理论最基本的内容。圈闭评价在石油地质理论中占有重要的地位,然而长期以来,它还停留在老概念中,即对于背斜构造还停留在以构造隆起幅度和构造面积两项作为主要评价内容,没有圈闭体积、圈闭量的概念。而在勘探断块油田时,断块的圈闭面积更是没有人说得清楚,于是只好根据断块的面积大小,加上主观的判断,随心所欲地上报圈闭面积;在布井方式上也只能见一个断块往上打一口井,不管这个断块是否有圈闭条件。好在断块油田中打井往往东方不亮西方亮,上面无油下面有,有时还“歪打正着”,会有新油层的发现。但当井位要得很急,容不得你慢慢地作研究时,就管不了这么多而直接打井,这样就造成了断块油田勘探上的长期的盲目性。

笔者在胜利油田地质处的长期工作实践中,深感断块油田的“圈闭”一词缺乏明确的定义,圈闭体积或圈闭量的概念还没有人仔细地考虑过,因此有必要对此问题作深入探讨。

长期以来,搞构造研究的人与搞地层、岩性、岩相的人是相互独立地开展研究工作的,殊不知圈闭量一

词必须将构造和地层联系起来，才有意义。没有储集层的构造是“空心构造”，储集层很厚而隆起幅度很小的构造是“水漂构造”。

我国东部不少油田是断块油田，油藏的形成与断层密切相关。断层对油藏既有开启连通作用，也有着封堵圈闭的作用。这是一个比较复杂的问题，但也的确是一个至关重要的问题。在我国东部断块油田的勘探初期，不少石油地质家们都已经初步认识到了断层的双重作用——连通与封堵作用。但是规律是什么？油藏到哪里去找呢？

胜利油田的一批地质家(陈斯忠、帅德福等)从丰富的实践中不断总结规律，在20世纪60年代中期就提出断层两侧“砂层不见面”以及“盖层不破坏(不断开)”两句话作为断块油藏形成的基本条件，当时的确指导了断块油藏的勘探工作。

可惜后来找到了另外一些油藏，局部地违反了这条基本规律——砂层见面也有含油的，于是“砂层不见面”的理论似乎不吃香了，并且逐渐地被人们遗忘掉。后来地震勘探很吃香，人们习惯于按照地震的构造图，见一个断块就在它的高点上打一口井，也不管什么砂层不见面了。

1980年，我在胜利油田许多地质家对断层封堵作用的研究基础上，进一步探讨了“盖层不破坏，砂岩不见面”的总规律。对Y12井的所谓“砂岩见面也有油”的异常现象进行了深入研究，经过对地层倾角作了相应的校正后，发现总规律还是十分正确的。并且认识到不能单纯地用地质力学分析方法来解决圈闭问题，新生界地层中的张性正断层平时承受了上百个标准大气压的地层压力，它们虽然是拉张的产物，但在地下它们总是想张而张不开，只在天然地震发生的那一刻里张开一下，地震过后，上下盘又压紧了。我们之所以称这些断层为张性正断层，是从地壳板块拉张的原动力和成因机制而赋予它们的名称。

1986年，我尝试了对断层的封堵系数、储集系数作某种计算，探讨了一维与二维空间的封堵量计算，从而对断块油田的“圈闭概念”有了新的认识，并在此基础上总结出“一图一井分析方法”。尝试应用在东营、广利和荆丘油田，得到了很好的地质效果。

1987年前后，我将研究结果相继在物探局研究院、物探局职工大学、中海油评价所及胜利油田等单位作专题讲座，引起普遍兴趣。物探局职工大学和胜利油田物探公司还将我的手稿作为内部刊物翻印成册，许多单位争相购买。我在微机上编制的5个研究断层封堵的专用程序，也无偿地送给大家使用。我的程序虽然还缺乏灵活性，但在当时，国外地震资料解释软件里，还没有出现断层封堵的商业软件，即使今天的商业软件，也还没有断层面溢出点分析的概念。我文章中关于断层面上的纯泥岩“涂抹作用”，也比国外杂志上发表的早得多。

此后，我曾将此文向几个油气勘探杂志社投了稿，但都因为篇幅太长而未能发表，编辑部希望我缩短改写，然而我又不愿改写，因而搁置下来。1987年，《石油物探》杂志只挑了我的一个较短的附件《符合小层对比原则的砂层内插技术》加以发表了。后来在吉林油田的勘探中使用了该技术，也内插出较出色的砂层剖面来。

2000年10月，中海油南海东部公司陈长民总地质师邀请我参加他们在番禺莲花山度假花园酒店召开的“断块油田勘探方法技术座谈会”。会上我介绍了我写于1978年的本书书稿内容，当时就引起了与会石油地质家的浓厚兴趣。东部公司拿出了他们在砂岩百分比20%～50%的地域找到一大批油田的图幅，使人感到与本书的结论是惊人地吻合(现附于后面，见图29)。

看来还是有必要将本书正式出版，以供广大石油勘探人员参考。最近本人在闲暇之时重新整理了当初的底稿，交付中国海洋大学出版社出版，也算了却了我的一个心愿。

本文内容的不足之处是我们讨论的圈闭概念主要还停留在以剖面形式表达的、二维分析方法，对于复杂连通体的断块油田及岩性油田方面还显得无能为力。

希望今后有机会，我再把三维空间的圈闭分析技术的程序调通，就可以更自动化地解决复杂断块的圈闭分析问题，甚至可以在三维数据体中，让计算机自动搜索出所有的背斜构造圈闭、断块圈闭、岩性圈闭以及地层圈闭。我认为，只要大家去开创，今后这肯定是可以做到的。此项工作就当前来说，是为解决勘探

上的问题；就长远来说，也是今后油田开发及油藏工程研究中所迫切需要的。

本篇可以作为参考资料供广大油气勘探工作者阅读，也可为大专院校讲述石油地质基础理论有关圈闭的概念补充相关表述实例。

构造研究和岩性研究应该联系起来加以考虑，但长期以来，它们是由两种专业人员分别加以研究，结合得不够密切。地震勘探可以查明构造圈闭，但对岩性的分析研究显得能力太薄弱。储层研究的人员利用各种录井、测井资料比较透彻地研究了储集层的分布，但往往良好的储层并无良好的圈闭条件。本文将构造与岩性研究结合起来，得到了估算圈闭体积的方法，尤其是对断块油藏有重要的指导意义。它说明地震资料与测井资料结合起来，会产生认识上的飞跃。一图一井分析法，为孔隙性储层的圈闭评价，提供了比较科学的依据。在有多井控制时，还可以提供岩性圈闭的信息。此方法尚有可能发展成为今后对盆地及构造带区域评价的重要手段，并进一步发展为三维空间寻找各类圈闭的综合性油藏分析、评价方法。

一、勘探历史经验的回顾

20 世纪 60 年代初，石油工业部在山东省东营凹陷中相继发现胜利村—坨庄油田，以及东营—辛镇等一批油田后，为扩大战果，向南部博兴地区打探井，发现那里有着一个很好的生油凹陷。T2 井见到下第三系沙河街组暗色泥岩厚达 1300 多米。油气显示极好，泥岩的裂缝中都装满了油，但是由于储集层物性差，只具有低产油流（图 1）。紧接着在其西面 10 km 高青地区钻井中发现沙河街组中有厚达 800 m 的大套好砂岩。于是认为高青砂岩体紧靠生油凹陷，想必大有来头，大家想在附近找出一个“科威特”大油田来*。于是一再在这个地区打井，但经过将近十年的钻探，始终没有找到“科威特”，就连像样的中小型油田也没有找到。这里有厚砂层的地方钻探结果基本上都是含水层或油水同层。后来才悟出其中道理，这附近没有像样的构造圈闭。

同样的例子出现在松辽盆地的西斜坡。大庆油田发现后，人们知道古龙凹陷是一个很好的生油凹陷。紧靠它的西面，在镇来、泰来到英台地区发现一套厚达 600 多米的好砂层。大家认为“伟大的英台砂岩体”紧挨着生油凹陷，必然大有作为，于是不断在这里打井。但是直到现在，只找到了一批小油田，其中最大的英台油田面积有 52 km^2，萨尔图油层储量仅几千万吨（这还算是不错的，该构造隆起幅度仅 15 m，见图 2）。

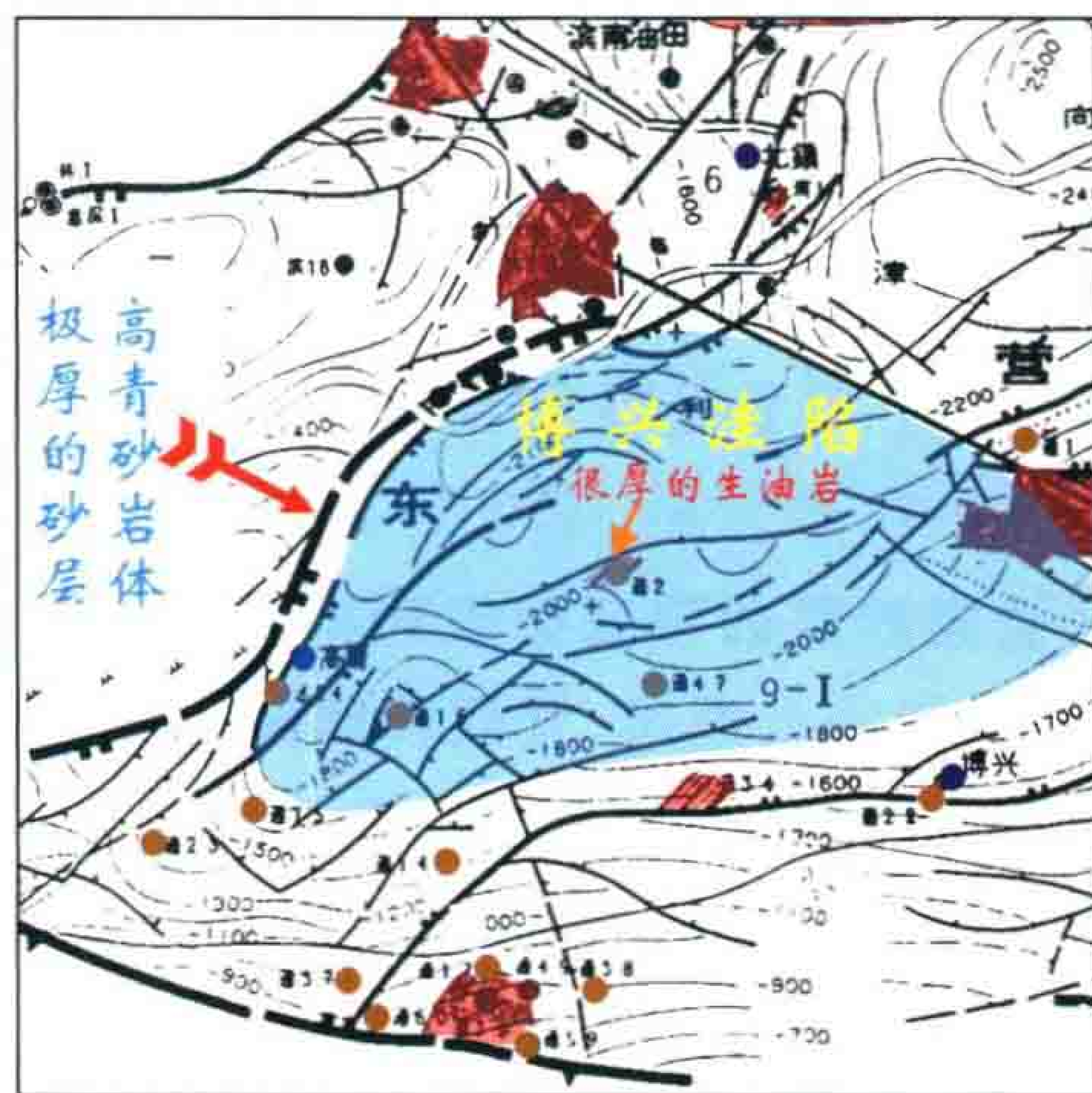


图 1　高青砂岩体并未找到大油田

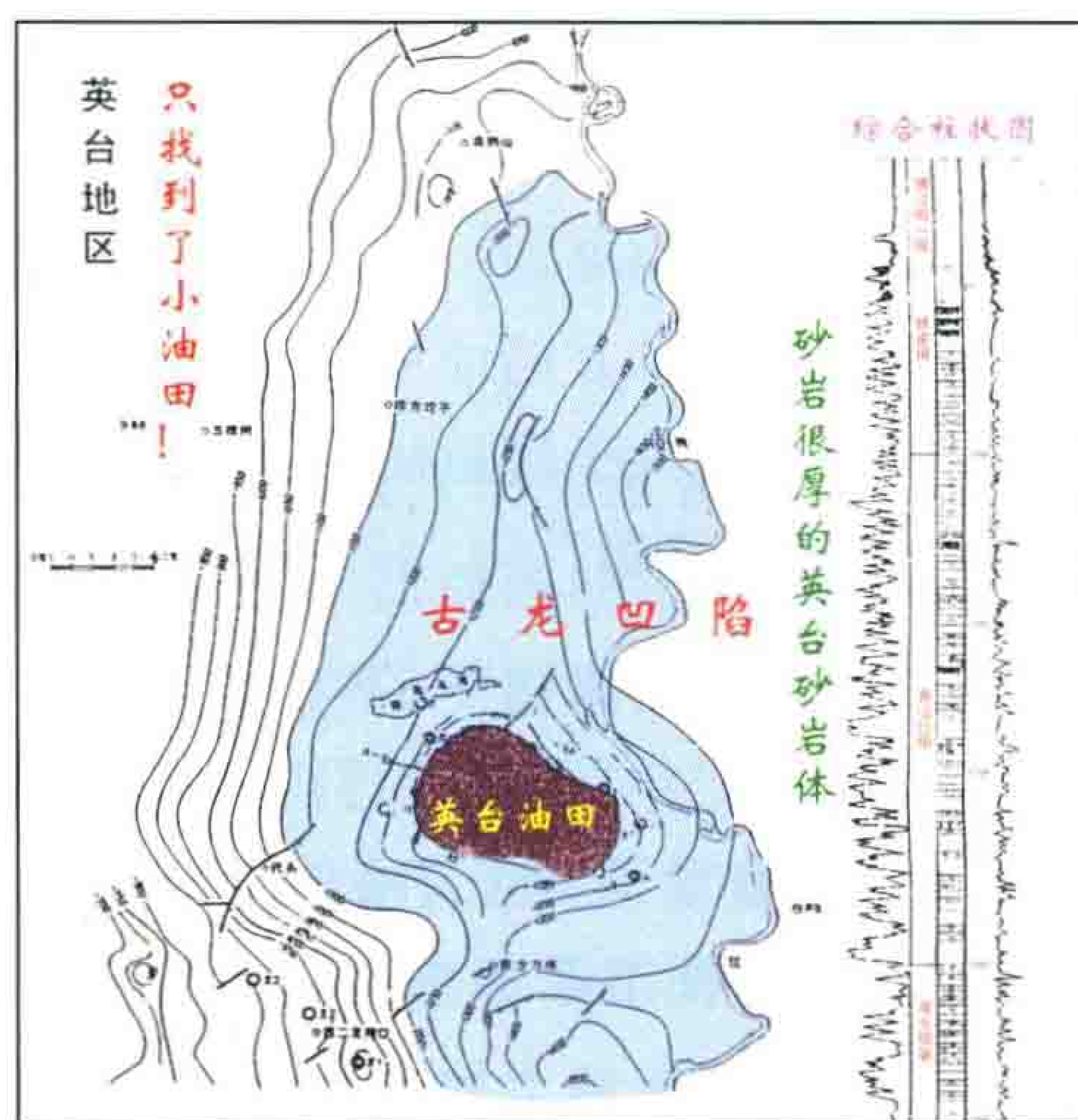


图 2　松辽盆地的西斜坡英台地区

后来在华北地区的钻探实践中，发现大多数厚砂层都是含水层，或者是顶部漂着一层油的油水同层。例如，孤岛油田的下馆陶组是一套厚砂层，却只有顶部漂着一层油。相反地，在砂泥岩间互的薄砂层中往

* 科威特布尔干油田有着巨厚的含油砂层，中白垩统布尔干组产油层砂层厚 350 m，构造面积 700 km^2，可采储量达 99×10^8 t。

往容易找到油层,而且常常还可以找到储量很大的油田。例如,孤岛油田的上馆陶组到明化镇组的含油气井段可长达400 m,然而该构造的隆起幅度却不到100 m,见图3。

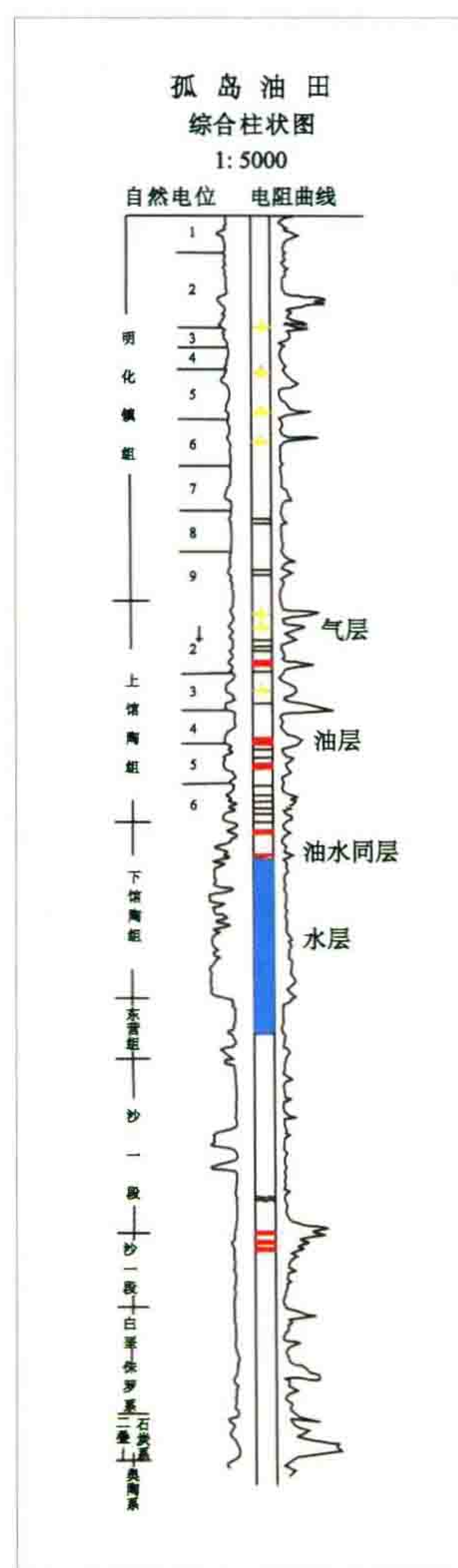


图3 孤岛油田综合柱状图

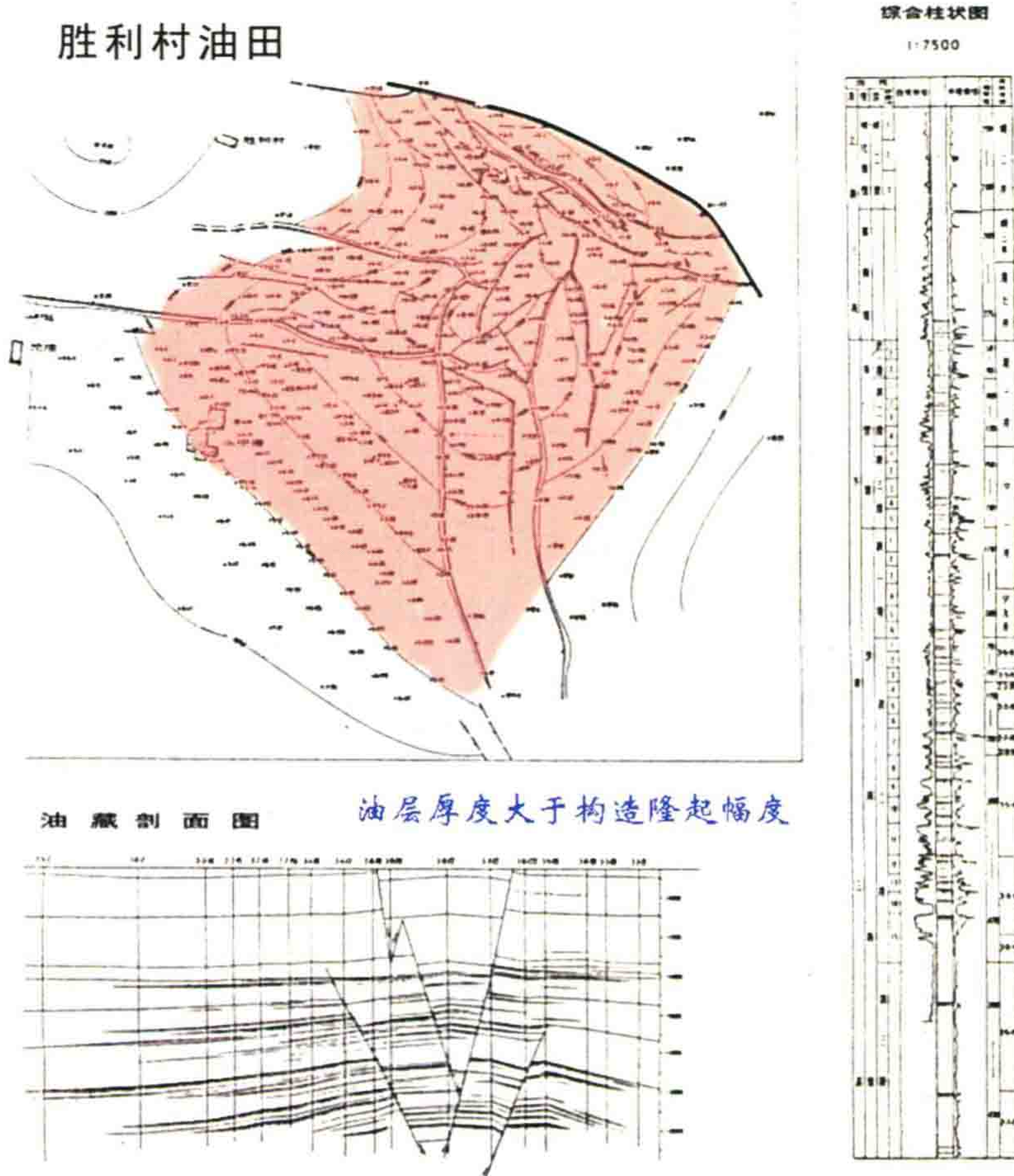


图4 胜利村油田油层厚度大于构造隆起幅度

胜利村构造隆起幅度约150 m(北倾闭合度实际上只有50 m,靠断层封闭),但此构造的井下含油井段常可长达1000多米,单井纯油层的累计厚度最厚可达200多米,见图4。

这种含油层厚度大于构造闭合幅度的现象还不是罕见的特例。陈斯忠同志形象地把这种现象比喻为层状油藏的“草帽摞草帽”。

仔细地分析上述勘探例子,不难搞清如下一条经验,储集砂层的研究必须和构造研究结合在一起,才能得出正确的结论。并且应该明白:① **大于闭合幅度**(包括构造及地层、岩性圈闭的幅度)**的储集层厚度是“无效储集层厚度”。**② **砂泥岩间互的层状油藏的累计油层厚度可以大于构造闭合幅度。**在构造隆起幅度不大的地区,对同一个构造圈闭来说,泥岩隔层愈多的砂泥岩互层,其油气总圈闭量也愈大。③ **油气总圈闭量是由构造形态加上地层岩性组合两方面的信息所决定的。只有对这两方面作综合分析,才能得到有效圈闭量的总的概念——这就是本文将要介绍的圈闭分析的中心思想。**

这些道理其实不值得对有经验的石油地质学家一谈,他们早就知道。然而在实际勘探工作中,由于人们还缺乏一套比较科学地对储集层及构造因素作出周密分析的综合研究方法,以致勘探工作常常导致失误。尤其是近年来一头扎进了断块油田,更陷入了某种盲目性,即见到一个断块高点就打一口井,不去研究一下这个断块是否真有封堵条件。为此,本文想抛砖引玉,提出一个如何对圈闭作具体分析的初步意见。希望大家来完善这项技术。

二、简单背斜构造的圈闭体积估算

先说说最简单的背斜构造的例子。

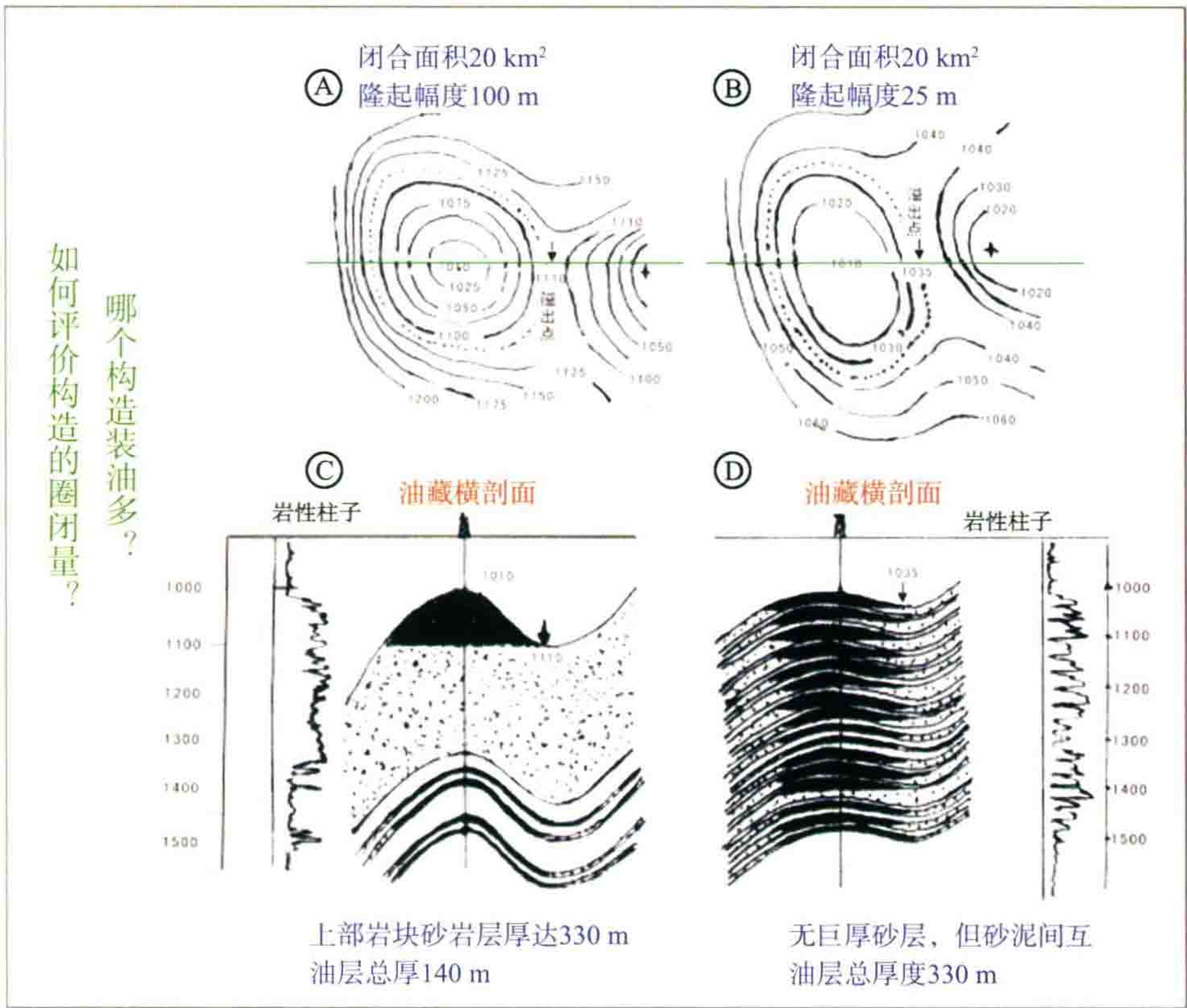


图 5 简单背斜构造的圈闭体积估算

例如图 5 中，同样大小的两个背斜构造，面积都是 20 km²。左边图Ⓐ里，背斜的隆起幅度为 100 m；右边图Ⓑ中，背斜隆起幅度仅 25 m，现在要问哪一个构造的圈闭量(圈闭的体积)大呢？

这完全要看这两个构造里分别所装的岩性柱子是什么样，才能作出判断。下方图Ⓒ是构造Ⓐ的岩性柱子，它有一个储层极好且极厚，达 350 m 的好砂层。其右方为其油藏剖面，见到封闭着一个块状油藏，纯油柱高仅 100 m，其下面是水，再下面泥岩隔层之下有四个层状油藏各厚 10 m。因此，这个构造如果装满油，可有纯油层 140 m。现在让我们看看右方图Ⓓ，它的隆起幅度虽然只有 25 m，但岩性柱子是一系列的砂岩与泥岩的互层。共 16 层砂层，单层厚 10～30 m，结果形成了许多层状油藏的油层迭合，其累计油层厚度达 300 m，为左图的两倍。

所以这个例子中Ⓑ比Ⓐ好。

这个例子说明：光是看构造圈闭面积大小和隆起幅度这两项指标，并不足以衡量实际圈闭量的大小(不足以评价该构造能装多少油)。然而，过去对一个新区的评价却主要看构造圈闭面积大小和隆起幅度两个指标。

当然，在一个构造没有打井之前是不能正确地知道其岩性柱子的，但是如果在构造的附近已经有过一口参数井，或者构造上第一口井孔钻完后，就可以定性地估算一下该构造的有效圈闭体积大致有多少。

其方法：假定这一口井所代表的岩性柱子在该构造范围内到处都一样(不考虑岩性变化因素)，于是可以作一个十字剖面(或者双十字)，绘出如图 5C、5D 这样的构造岩性剖面。第一条剖面选择为通过构造高点及鞍部溢出点的主干剖面，根据溢出点的横坐标位置投到每个砂层中去，然后把能够装油的部分涂黑，这就是剖面中的圈闭量。然后再作其他剖面，并将主剖面所得之各砂层的油气溢出点海拔高程投到各砂

层中去，依据它，将能够装油的部分涂黑。最后，把这些剖面里每个横坐标点上纵向涂黑部分的累加厚度标到平面图上去，可以勾绘出平面的圈闭砂层的等厚度线来，据此计算出该构造的实际圈闭体积。这就是总圈闭量，如果再乘上平均孔隙度及原油密度及体积系数，就是该构造装满油时近似的最大地质储量（这实际上就是储量计算方法中的体积法）。

三、对断块油田封堵条件的认识

对断块油田的圈闭分析难度就较大。首先我们要讨论一下对断块油田封堵条件的认识问题。

断层对油藏既有开启连通作用，也有着封堵圈闭的作用。这是一个比较复杂的问题，但也的确是一个至关重要的问题。因为我国东部不少油田是断块油田，油藏的形成与断层密切相关。在我国东部断块油田的勘探初期，不少石油地质学家们都已经初步认识到了断层的双重作用（连通与封堵作用）。但是规律是什么？油藏到哪里去找呢？

胜利油田的一批地质学家（陈斯忠、帅德福等）从丰富的实践中不断总结规律，在 20 世纪 60 年代中期就提出断层两侧"砂层不见面"以及"盖层不破坏"两句话作为断块油藏形成的基本条件。当时的确指导了断块油藏的勘探工作。

图 6、图 7 所示的东辛油田油藏剖面，的确清楚地告诉我们，断块油田在这里主要是由泥岩所封堵而形成油藏的。可惜后来由于找到了另外一些油藏局部地违反了这条基本规律（砂层见面也有含油的），于是"砂层不见面"的理论似乎不吃香了，并且逐渐地被人们遗忘掉。后来地震勘探很吃香，人们习惯于按照地震的构造图，见一个断块就在它的高点上打一口井，也不管什么砂层不见面了。

这种不作具体分析的布井方法看来还会继续延用下去。第一个原因是断块油田中打井往往东方不亮西方亮，上面无油下面有，有时还"歪打正着"，会有新油层的发现。第二个原因是如果要仔细作具体分析，在三维空间中研究砂层见不见面也实在太复杂了，我们还缺乏一套比较科学而有效的方法和手段。然而井位又要得很急，容不得你慢慢地作研究。所以往往就管不了这么多，于是形成了布井上的某种盲目性，这也就造成了钻探成功率的下降。

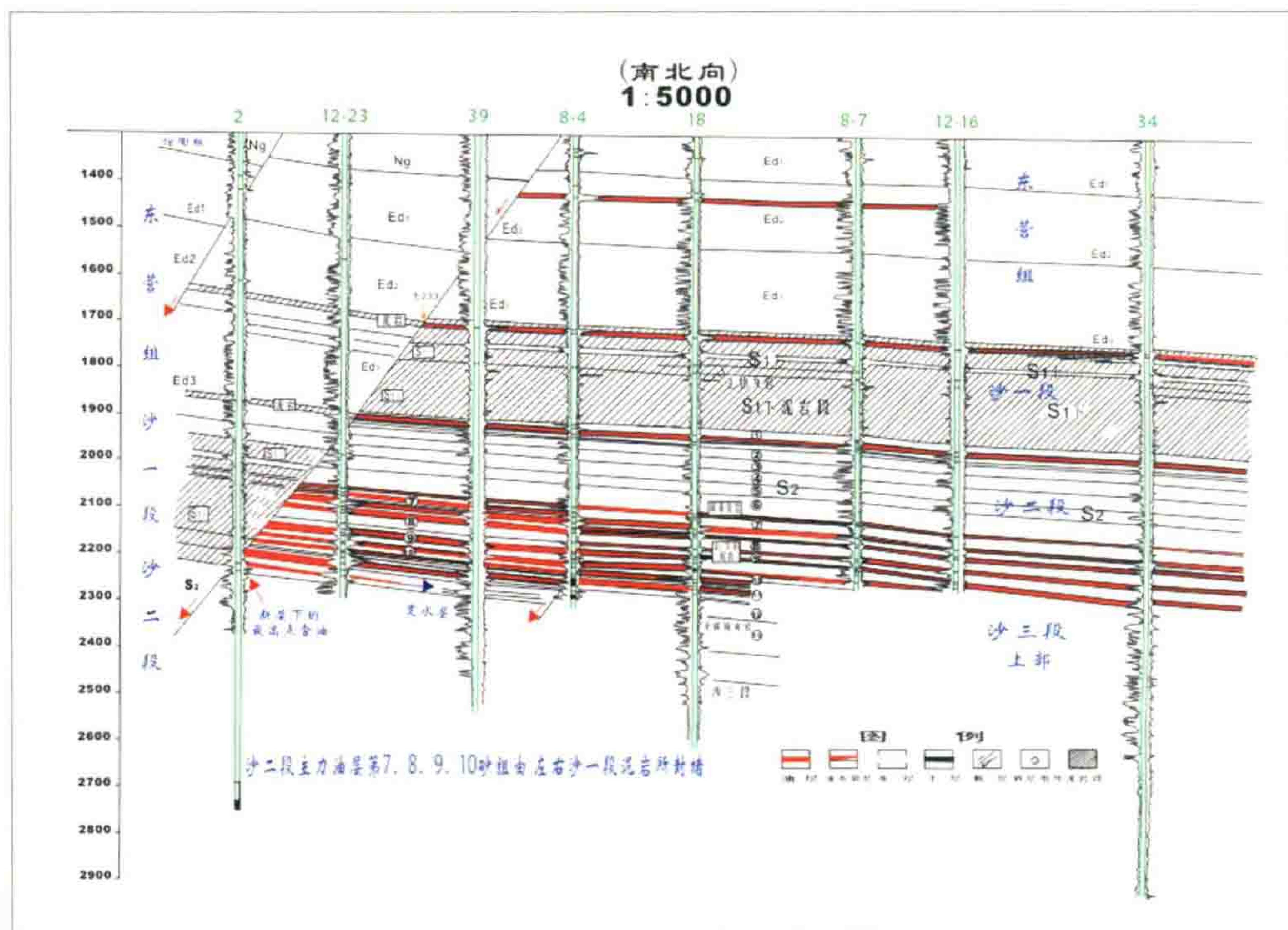


图 6 营 8 断块区油藏剖面图

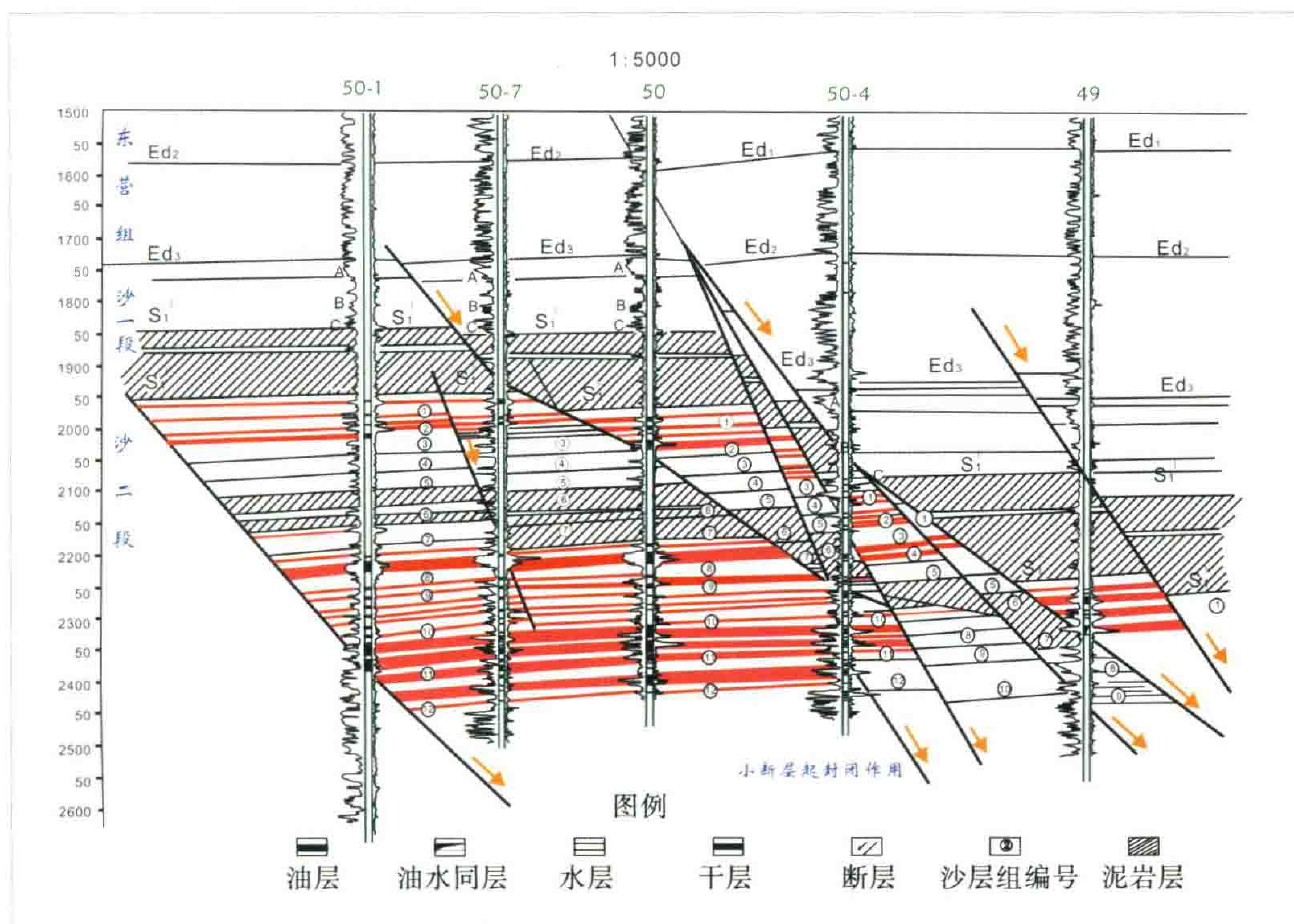


图 7　辛 50 断块区油藏横剖面图

在 20 世纪 70 年代中期，对断层的封堵研究工作一度又转向了用地质力学的观点来解释断块油藏的封堵现象。当然，这也是一种有益的尝试。但是，简单的地质力学分析并不能解决问题。不少人对我国东部由于地壳拉张所形成的大量正断层到底是张性结构面还是压性结构面，作了过多而不必要的探讨，以为这种探讨可以解决哪些断层具有封闭条件而哪些不具备封闭条件。还有不少地质学家仔细地查看地面露头，发现张性断层的裂缝普遍较大，因而认为张性断层不利于油气保存。实际上深埋于地下的张性断层的情况和露头上或常压实验室中的情况完全不同。因为地下岩石承受着巨大的地层压力。**例如，在 2000 米深度处，岩石所承受的地层岩柱压力接近为 50 MPa**！而第三系松软地层本身还处于固结成岩的过程之中，它还具有一定的可塑性，不像已经成岩固结的老地层，可以在地下形成明显的张开缝洞。**所以，实际上华北地区新生界地层在地下的无数张性正断层，平时没有一个是“张开”的。相反其断层面是实实地压死的。几十年里只有在地震发生的几分钟它张了一下。地震过后，上下盘又压紧了。我们称这些断层为张性正断层，是根据从地壳板块拉张的原动力和成因机制而赋予它们的名称。它们是拉张的产物，但在地下它们总是想张而张不了，只在地震的时候张了一下。**

我们在华北第三系地层中众多的钻孔取芯的岩石样品也说明了这个问题。**一条断距达 100～200 m 的正断层，其断层面往往是很简单的一个面，破碎带也仅影响数米**。在这种断层面附近，砂岩与泥岩有着完全不同的表现。砂岩中常见多组微裂缝及节理，多呈菱形结构或树枝分叉状，但这些裂缝在地下都不是张开的。泥岩、页岩则常表现为具有众多的挤压滑动面，擦痕极发育，光亮而有明显的动力变质结构。其黏土矿物作定向排列，消光方位一致，常具有胶岭石及拜来石矿物薄膜，且有揉皱结构。当断层面上泥质岩占主导成分时，其结果是使断层面封堵。反之，砂岩占主要成分时，就会有侧向连通或者沿着断层油气向上缓慢运移散失、及形成浅层次生油气藏的现象。这就是华北地区断层作用的主要规律。

同一条断层在它的上下不同砂泥岩比例的各层段里，是会有着不同的封、散作用的。因此，当然不能简单地用地质力学的分类方法把一条断层对油气的作用说清楚。

总之，我认为我国东部松软的第三系地层中的拉张性正断层，它们总的来说不是开启性的，因而，对油藏的形成它们是功多于过。在背斜构造极少的箕状盆地中，多亏有一系列的断层，才形成了众多的油田。对断层的封闭性，具体地说，泥岩为主的地层剖面则封闭性良好，砂岩为主的剖面段则产生纵向及横向串

通。这就是主要结论。

当然,断层面对油气封、散的作用实际上还有其他的影响因素:如地质历史时期中的后期压实作用,不同水动力条件下的胶结作用,断裂的多次活动及其强度的变化,以及它与油气运移时期的配合关系等。但是重要的是,我们要把握住客观事物的主要规律,所以我认为我们必须重视对断层两侧砂泥岩接触关系的研究。20 世纪 60 年代胜利油田的地质学家们提出的"砂层不见面,盖层不破坏"的大方向是基本正确的。

但砂岩见面的断层有时也具有一定的封堵性,这是近年来勘探实践中所发现的另一个事实。

过去认为比较过硬的例子出现在东营凹陷永安镇油田 12 井断块上,那里断层两侧是沙二及沙三上段的砂岩层,但却封住了南侧的一个油气藏。见剖面图图 8 及柱状对比图 9。12 井的这个实例中,如果不作地层倾角的校正,简单地把两口井的电测曲线拉齐作对比,那么,的确感到有些困惑。图 9 中,我们将两口井的井柱经过 150 m 井距的 11 度地层倾角的垂向深度校正了 30 m[校正方法参照下文的公式(6)],却发现 12-1 井沙三上的所有油层都正好为上盘 12 井沙二、三段的泥岩所封堵,并且图 9 中含气层的封堵盘岩性还是厚泥岩。事实竟是如此的精彩!

可见"砂层不见面,盖层不破坏"的大方向还是正确的。

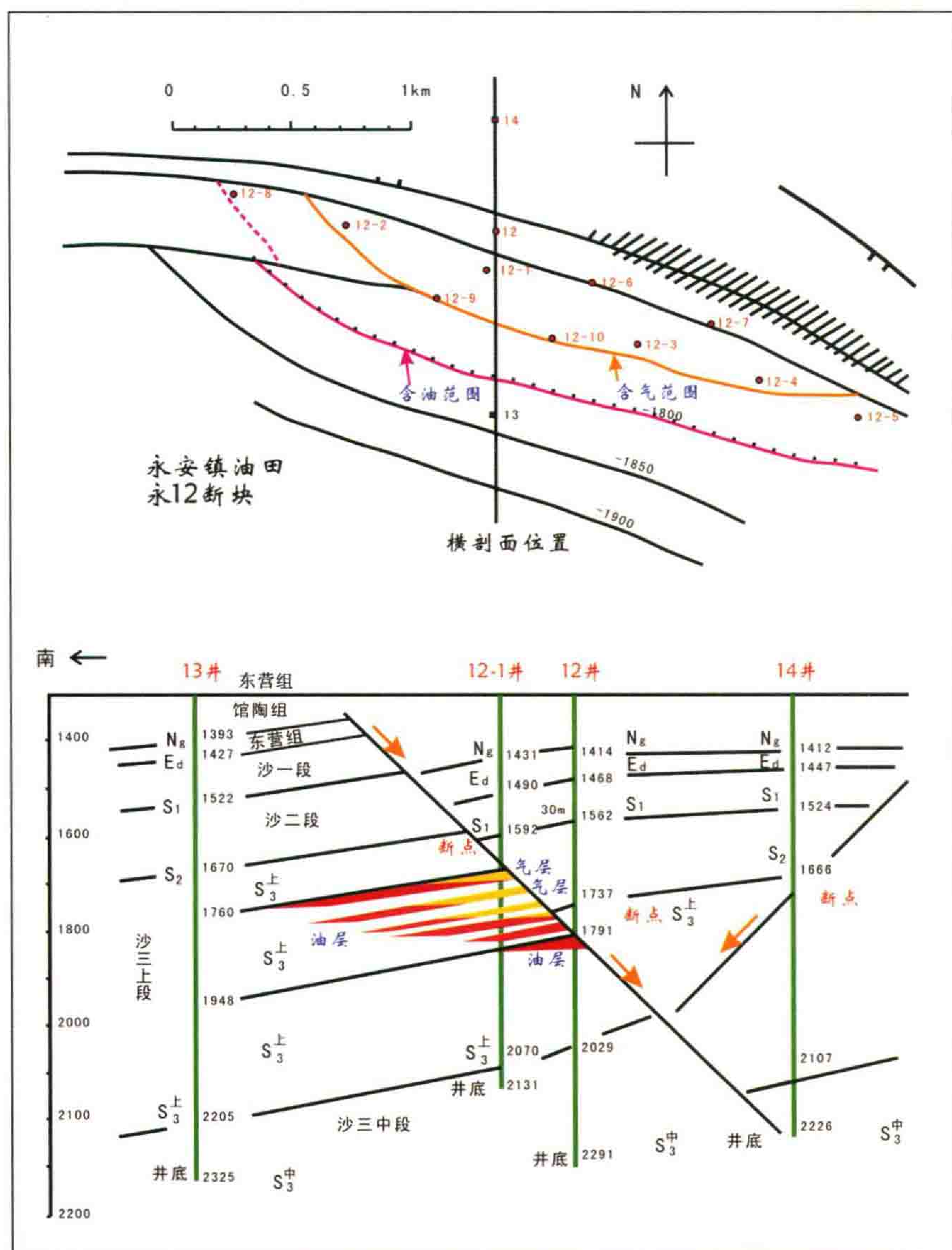


图 8　永安镇油田 12 井构造图及断块油藏横剖面

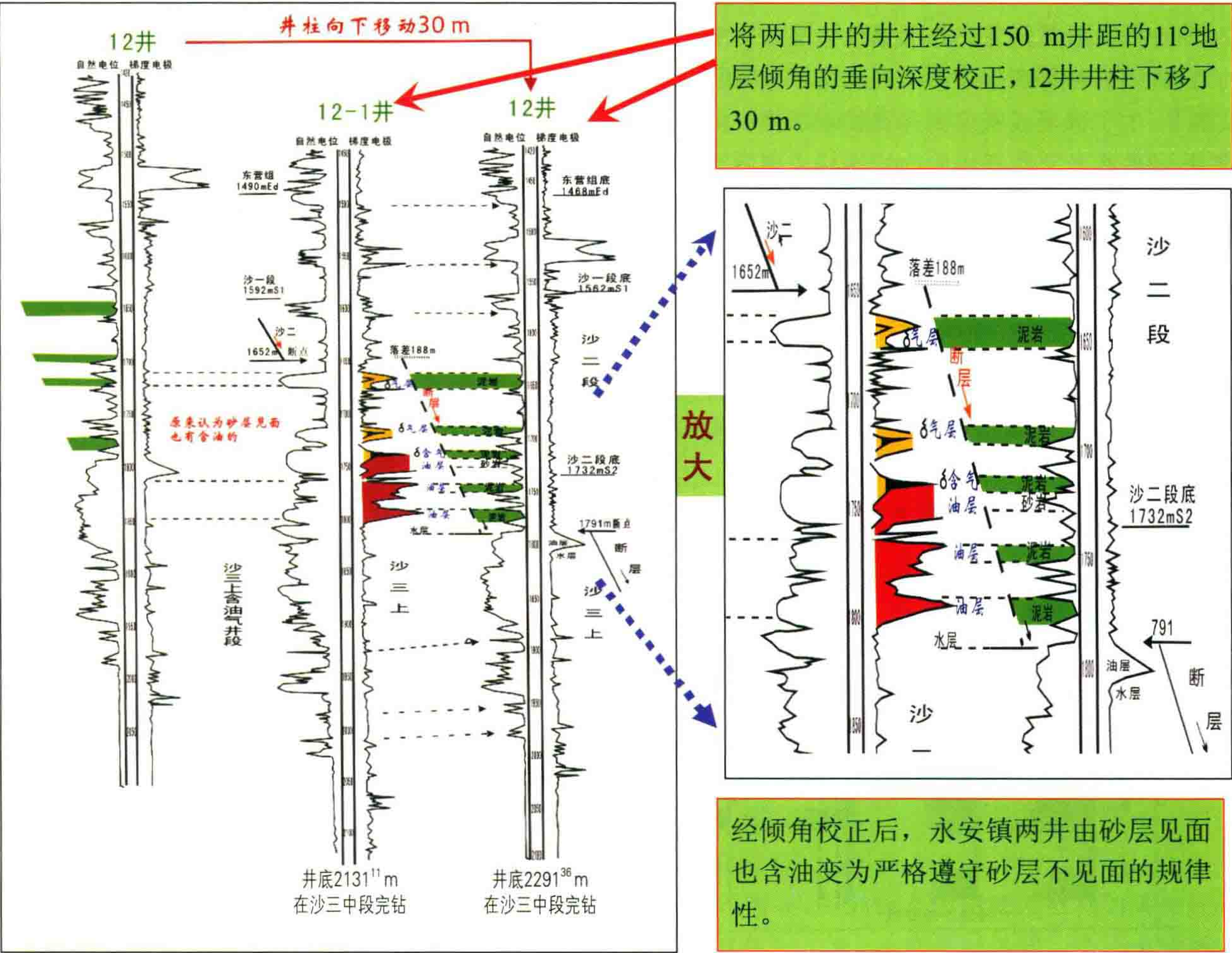


图 9　永安镇油田 12 井断块柱状对比图

在东营—辛镇油田上还可以找到一些砂层见面而实际是封闭的一些例子。产生这种现象的另一原因还在于这些含油砂层在断开过程中曾经长期与封堵盘的泥岩接触，因而受泥岩"涂抹"过，其孔隙通道被泥质颗粒挤压充填，形成一个渗透性比较差的封堵薄层面。这种特殊封堵现象一般产生在夹有纯泥层的沙泥互层中，即在含油砂层上方不远之处，存在着过去断层接触过的大套纯泥岩段，因而形成封堵。请注意图 8～9 中，含油砂岩上方 12 井沙二段有较厚、较纯的泥岩段，就是一个典型。

相反，在大套粗相带中，断开的砂层与砂层见面时，就从来没有见到有封堵的现象(例如盆地边界的一级大断层)。所以，并不是砂岩见面都可以是封堵的。如果我们看到个别地方砂岩见面也封堵的现象而否定了砂岩不见面的主要规律，那么是很遗憾的事。我们应该承认其主要规律，而在评价时又考虑到沙泥岩互层的条件下，局部的砂层见面还可能存在局部封堵的现象，这才是比较客观的态度。本文将采取这种做法。

四、断面上的封堵系数、储集系数及封闭量计算

现在我们先来研究一维(深度)空间情况下断层封闭量的计算方法。

首先要对断层两盘接触的地层作储集层划分及封堵层划分。

例如我们要研究一个断层的上升盘的封闭量时，则将上升盘视作储集盘，将下降盘视为封堵盘。研究下降盘时就倒过来。

先对储集盘的岩性柱子划分出其各储层的位置及评价其储层的优劣。可将砂岩类及粉砂岩类当作储层，而将泥质岩类及各种非渗透性岩层当作非储层(如岩盐、石膏、火成岩以及钙质胶结后孔隙度小于5%的致密砂岩，都可视作非渗透性岩层)。储层的优劣评价主要看其孔隙度的好坏。地层的孔隙率可以从声波测井，中子伽玛或密度测井资料来求得。但事实上我们只需要一个粗略的估计，所以一般从自然电位曲线、井径曲线及完井报告上的岩性柱子也就有足够的精度。

于是可以绘出一个按1 m或2 m采样的简化了的储层划分曲线，如图10的第②条曲线。此曲线上将非渗透层当作0，好砂岩当作1，粉砂岩当作0.5(如果想表达得更精确，那么在砂岩及粉砂岩类的位置上直接用其孔隙率百分数，只将非渗透性层部分当成0)。

这样的曲线②可称作储集系数曲线。

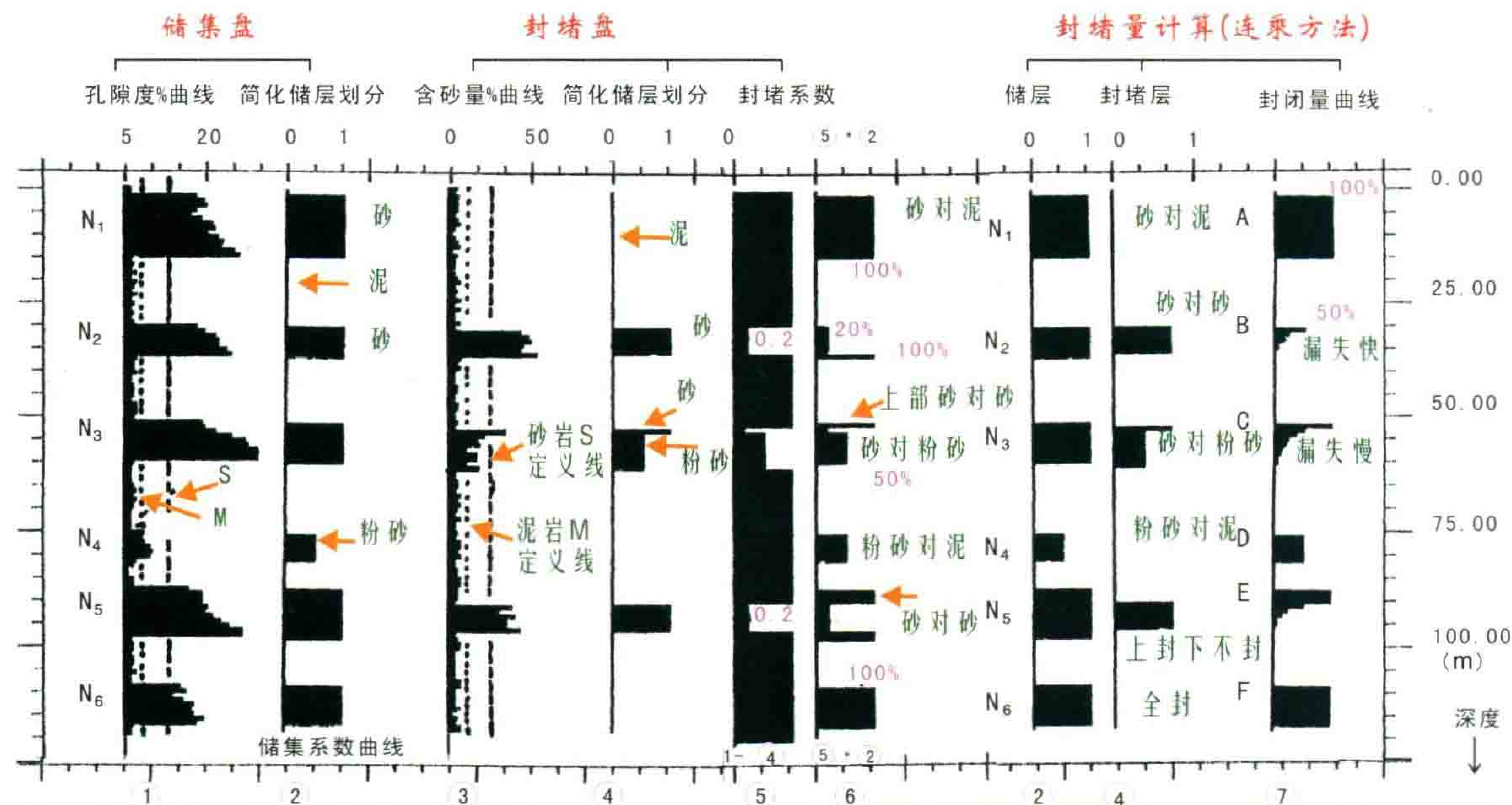


图10 断面上的封堵系数、储集系数及封闭量计算方法

下一步是对封堵盘作封堵层的划分及对其封堵质量的好坏作一次评价。首先要绘出一个简化了的封堵层划分曲线，如图10第④条曲线。此曲线可以根据测井解释的含砂量百分数曲线(或含泥量百分数)加以判定，更简单的办法是根据自然电位曲线或完井岩性柱子来划分。封堵质量的好坏用封堵系数表示：令泥岩的封堵系数为1，砂岩的封堵系数为0，粉砂质泥岩或泥质粉砂岩的封堵系数为0.5。如图10中曲线⑤，此称封堵系数曲线。

最简单的办法是将1.0减去曲线④就得到曲线⑤的封堵系数曲线*。

储集系数乘上封堵系数就是封闭量(或称封堵量)。

(1)直接相乘法。

简单的封闭量计算方法是将储集系数 R_i 曲线与封堵系数曲线 S_i 直接逐点相乘，得到封闭量曲线 Q_i。

$$Q_i = R_i \cdot S_i \quad (i=1,2,3\cdots n) \qquad \text{公式(1)}$$

图中曲线⑥就是曲线②与曲线⑤的逐点相乘，这里假定了砂层是完全不封堵的，所以砂对砂之处封闭量为零。

封闭量曲线可以定性地反映出在该断层接触面上总共封住了多少量，将其从上到下累计相加，再乘上好砂层的平均孔隙度就反映了此断面上的封堵的总量。

(2)考虑砂岩漏失率的连乘计算方法。

* 如果认为砂岩见面也可以封住一部分，则可定义砂岩的封堵系数为0.2，粉砂质泥岩的封堵系数为0.7……。这在我们编的程序中是可以由用户自行定义的。

前面介绍的直接相乘法给了砂岩一个封堵系数(0 或者 0.2)以后,就不再考虑砂层的厚薄。实际上储层碰到封堵盘相遇的砂层愈厚时,其漏失也愈厉害。所以,可以采用按样点连乘的方法来计算封堵系数。

先规定封堵层不同岩性的漏失率。例如,砂岩的漏失率为每米砂岩漏失 50%,则封堵连乘数为 0.5;粉砂质泥岩每米漏失 30%,则封堵连乘数为 0.7;泥质岩不漏失,封堵连乘数为 1.0。

于是从每个储层的最顶上一个样点开始,设原始封堵数为 1,见到对面 1 m 砂层就乘 0.5,见到 1 m 粉砂质岩就再乘 0.7,见到 1 m 泥质岩就乘 1。一直乘到该储层的底界为止。可用下列公式表达:

$$封堵系数 \quad S_i = \prod S_k \quad (k=1,2,3\cdots K) \qquad 公式(2)$$

$\prod$ 是连乘积,其中 S_k 是不同岩性的封堵连乘数(它等于 1 减去漏失率),k 从每个储层的顶开始连乘,K 为该储层的厚度(样点数)。

有了封堵系数 S_i 及储集系数 R_i 两条曲线后,再逐点相乘,形成如图 10 右方第⑦曲线那样的封闭量曲线。在此曲线 B 处是砂岩见面的情况,封闭量曲线呈指数衰减,下面在 C 处为砂对粉砂,就以 0.7 作连乘,反映为漏失较缓慢。

连乘方法似乎较简单相乘法为合理,在计算机上实现也不难。砂岩的漏失率是由用户决定的,并且它与岩性柱子每个样点代表几米有关系。

(3) 对封堵系数计算方法的改进(历史增减法)。

直接相乘法和连乘法都还不能很好处理有着泥岩“涂抹”现象的砂岩见面而仍然封堵的现象,设想今后可以用“历史增减法”来求取封堵系数,其方法如下。

在封堵盘岩性柱子里,从上向下计算每个样点的封堵系数 S_k。假定落差为 dz 个样点,每个样点从它的下面 dz 个样点开始,令起始的封堵系数为 0.5。此后每遇到 1 m 砂层就减去一个 ds(例如 0.02 或 0.05);每遇到 1 m 粉砂岩就减去一个 df(例如 0.01 或 0.02);而每遇到 1 m 泥岩就增加一个 dm(例如 0.04或 0.08)。依次向上做加减法,并且规定封堵系数 S_k 不得大于 1 也不得小于 0(即大于 1 时,令它等于 1;小于 0 时,令它等于 0)。如此累加直到被计算的这个样点为止,得到该点的封堵系数。如果被计算的点本身是泥岩,则不用作此累加计算,而直接定义它的封堵系数为 1.0。这样便可得到一条历史增减法的封堵系数曲线。用这条曲线与储集盘的储层评价系数再作逐点相乘,便得到封闭量曲线。

这种处理方法就可以允许在厚的泥岩段之上下,当存在局部砂岩时,仍然可以封住油气,而砂层很厚时又漏掉油气。即封堵系数是与落差范围内砂岩上方的累计泥岩厚度以及自身的厚度有着关联。它是一个变化着的、与断层落差发展历史有关的量。这样处理可能较为合理。

在程序中 ds、df 及 dm 由用户规定,当采样率为 2 m 一个点时,例如,ds 如规定为 0.05,则每遇 2 m 砂岩减去 0.05,经过 20 个样点(即 40 m)的砂层,S_k 就可以由 1 降为 0。反之,如果此时规定 dm 为0.08,则经过 12.5 个泥岩样点(25 m),S_k 又可以从 0 增加恢复为 1。

这是笔者在 1987 年此文完稿时所想到的一种方法,它可能在今后会取得更好的效果。

五、断层面倾角及地层倾角对岩性接触面的影响——倾角校正方法

上面所讲的封闭量计算是没有考虑断层面倾斜和地层面倾角的。

我们用作研究的基本数据是井下所得之柱状剖面,它是地层在铅垂方向的视厚度。但是断层两侧的岩性接触情况完全取决于断层面上的上下盘砂泥岩接触关系,参看图 11。因此,按理我们应该先绘出倾斜而弯曲的断层面上(如图上 A、B、R、T 等点)两侧岩性接触面。但这样做很不方便,它既不是真厚度,也不是真深度,又不是铅垂方向的视厚度,很难作图。此外,即使这样作图及分析之后,还要投影回来,回到储集盘某井的井柱子上来(即投到图 11 中的 F、O、I、J 等点上来),以说明井下各点的封堵性。为了简化分析作图过程,我们的办法是直接采用储集盘的井下柱状剖面来作分析(即用其铅垂深度及视厚度)。例如,当研究上升盘时,把 1 号井的井柱子保持不动,用一个公式将下降盘的砂泥岩井柱子先投影到倾斜的

断层面上去(即 Y、G、P、Q 等点投到 A、B、R、T 点上),再投影到上升盘的井柱子上去(即 F、O、I、J 四个点),从而研究上、下盘砂泥岩的接触关系及封堵情况。

在图 11 中,假定断层两侧有两口钻井,左侧储集盘的地层倾角为 α,右侧封堵盘的地层倾角为 β,而断层面的倾角则为 φ(以此图所示的角度为正角)。设地震构造图的作图标准层为 M_0 层,如图所示,这个 M_0 层位与断层面相交于断棱 A 及 B 两点。**$AB=\Delta D$** 就是"断距",其水平分量 ΔX 称为断层的"平错"(即 AD 段),垂直分量 ΔZ 就称为"落差"(即 BD 段)。

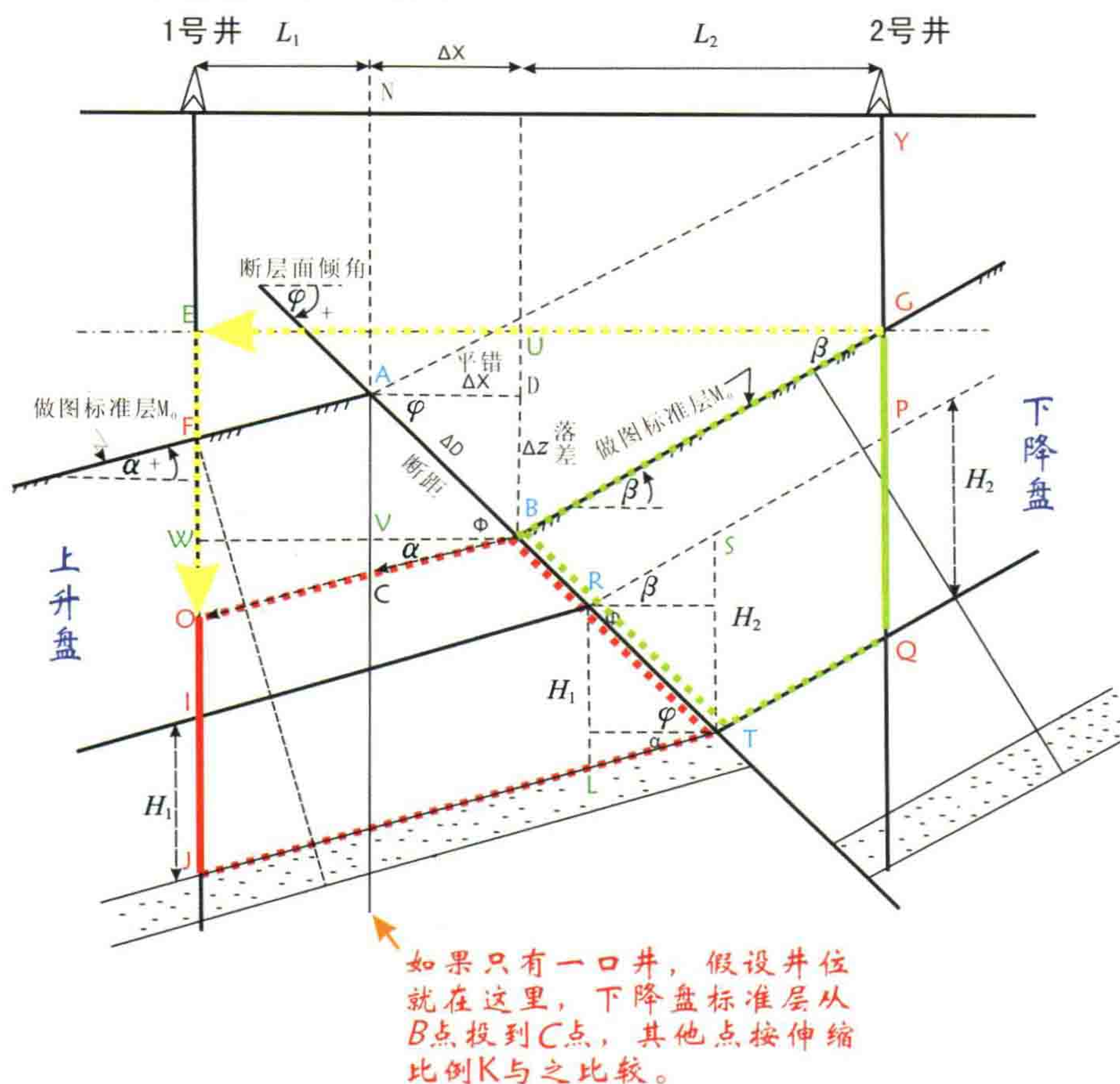


图 11 考虑断层面倾角和地层倾角对岩性接触面影响的倾角校正方法

由图可知:第一,下降盘的 2 号井井下的作图标准层 G 点投到断层面上将是 B 点,而 B 点投到 1 号井井下将是 O 点,所以 2 号井井下的标准层 G 点直接投到 1 号井井下,将向下移动一个 EO 距离;第二,2 号井的井柱子 PQ 一段(其铅垂厚度为 H_2),投到断层面上将是 RT 一段,而 1 号井中将是 IJ 段与之相接触,IJ 段的厚度为 H_1,所以 PQ 段需要压缩一个比例因子,使它由 H_2 缩成 H_1,才能与 1 号井相比较而研究其封堵接触关系。因此,将 2 号井井柱直接投到 1 号井井下需要作一次压缩,同时要向下移动一下。

由简单的三角函数关系,可推知:

下移量: $$SH=EO=WO+BU=(L_1+\Delta X)\cdot\tan\alpha+L_2\cdot\tan\beta \qquad \text{公式(3)}$$

其中 ΔX 就是平移,$\Delta X=\Delta Z\cdot\cot\varphi$

ΔX 也就是地震构造图上断层线的上下棱空开的宽度,L_1 及 L_2 是两口井距离上下盘断棱在地面投影点的水平距离。L_1、L_2、ΔX 三者相加就是两井间的平面距离。上下盘地层倾角 α 及 β 以向右上升者定义为正角,反之为负角。断层面倾角也如图中箭头方向为正。

又从四边形 $RSTL$ 的三角关系可知:

伸缩系数 $$K=\frac{H_1}{H_2}=\frac{\tan\varphi+\tan\alpha}{\tan\varphi+\tan\beta}$$

或者：
$$K=\frac{\sin(\varphi+\alpha)\cdot\cos\beta}{\sin(\varphi+\beta)\cdot\cos\alpha} \qquad \text{公式(4)}$$

有了以上两个公式，我们就可以把两口井的岩性接触关系搞清楚了。计算机就可以自动帮助我们判断储集盘上的某砂层到底与对面封堵盘砂层见不见面，并且算出封闭量来。这比人用手绘出一层层砂层延伸到断面，再作分析要快得多。

对公式(4)缩放系数 K，我们作了一次理论计算，表达在图 12。此图横坐标是封堵盘的倾角 β，纵坐标是系数 K。我们绘了三簇曲线，它们分别代表储集盘倾角 α 等于 0°、30°及 60°的情况。图上曲线参变量是断层面的倾角 φ，φ 从 30°算到 60°的情况，只算了正断层的情况。

$$K=\frac{\tan\varphi+\tan\alpha}{\tan\varphi+\tan\beta}=\frac{\sin(\varphi+\alpha)\cos\beta}{\sin(\varphi+\beta)\cos\alpha}$$

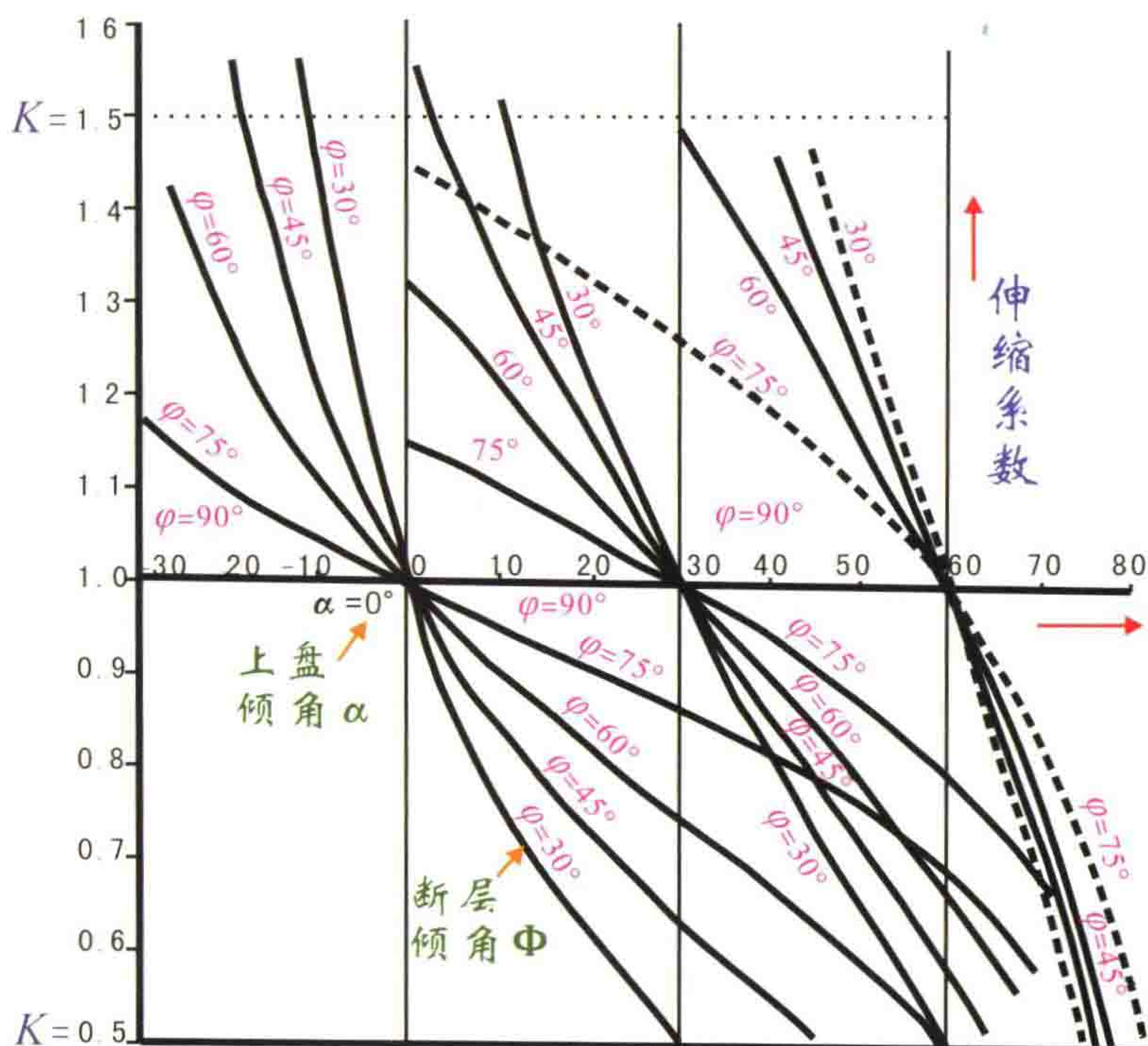


图 12 伸缩系数计算结果

由此图可见，当断层面倾角 $\varphi=90°$时 K 恒等于 1。所以当断层面近于直立时，不需乘什么缩放系数。其次，由公式(4)可知，在上下盘的倾角相等，$\alpha=\beta$ 时，不管 φ 等于多少，K 也恒等于 1。所以当上下盘倾角相近时也不需乘缩放系数。并且此时，下移量 $SH=EO=(L_1+\Delta X+L_2)\cdot\tan\alpha$，也就是两井平面距直接乘上 $\tan\alpha$ 就是下移量。

此外，由图可知，在断层面倾角很平缓，例如 30°到 45°之间时，缩放系数就不可忽视。

当我们要研究下降盘的封闭量时，则应将图 11 中的 2 号井作为标准柱子，保持不动。而将 1 号井往 2 号井投影，此时标准层的 F 点将投到 2 号井(G 点的上方)的 Y 点去。只需把图中 α 与 β 互换，L_1 与 L_2 互换，公式的样子将完全不变。

当只有一口钻井资料时，就需假设上下盘的岩性柱子是相同的，于是，可将该井井柱移到需要研究的储集盘的断棱点上，如图 11 中 A 点上方的 N 点位置。此时封堵盘作图标准层在断层面上的位置是 B，它向 A 点下方投到 C 位置。所以应该先作一个下移量为 AC，同时将整个封堵盘柱子再作一次缩放。缩放系数 K 仍旧遵循公式(4)。而下移量有如下形式：

下移量：
$$SH=AC=AV+VC=\Delta Z+\Delta X\cdot\tan\alpha$$

或者
$$SH=\Delta Z\cdot(1+\tan\alpha\cdot\cot\varphi) \qquad \text{公式(5)}$$

当地层倾角 α 不大时，可以认为此下移量就接近等于落差 ΔZ。

我国东部地区，地层面倾角一般不是很陡（小于15°），断层面倾角大致为45°～60°。此时，缩放系数K值大致为0.9～1.1之间，岩性柱子的缩放量不是太大。只要被研究的岩性柱子不是太长，可以不考虑缩放系数K。

简单的情况：当上下盘地层倾角几乎相等（$\alpha=\beta$），且断层面倾角为45°时，$\tan 45°=1$

下移量：
$$SH=(L_1+L_2+\Delta X)\cdot\tan\alpha$$

即
$$SH=\text{井距}\cdot\tan\alpha \qquad \text{公式(6)}$$

伸缩系数
$$K=\frac{1+\tan\beta}{1+\tan\alpha}=1$$

于是只要作下移量校正就行。

六、断块构造的圈闭分析方法（一图一井分析法）

先举一个断鼻构造的例子，见图13。有一条西倾正断层，在平面上圈闭了五条等高线。构造溢出点在−1100 m海拔深度。一口探井打在西面圈闭之外。现在来分析一下，这个断鼻构造的圈闭量到底有多少。

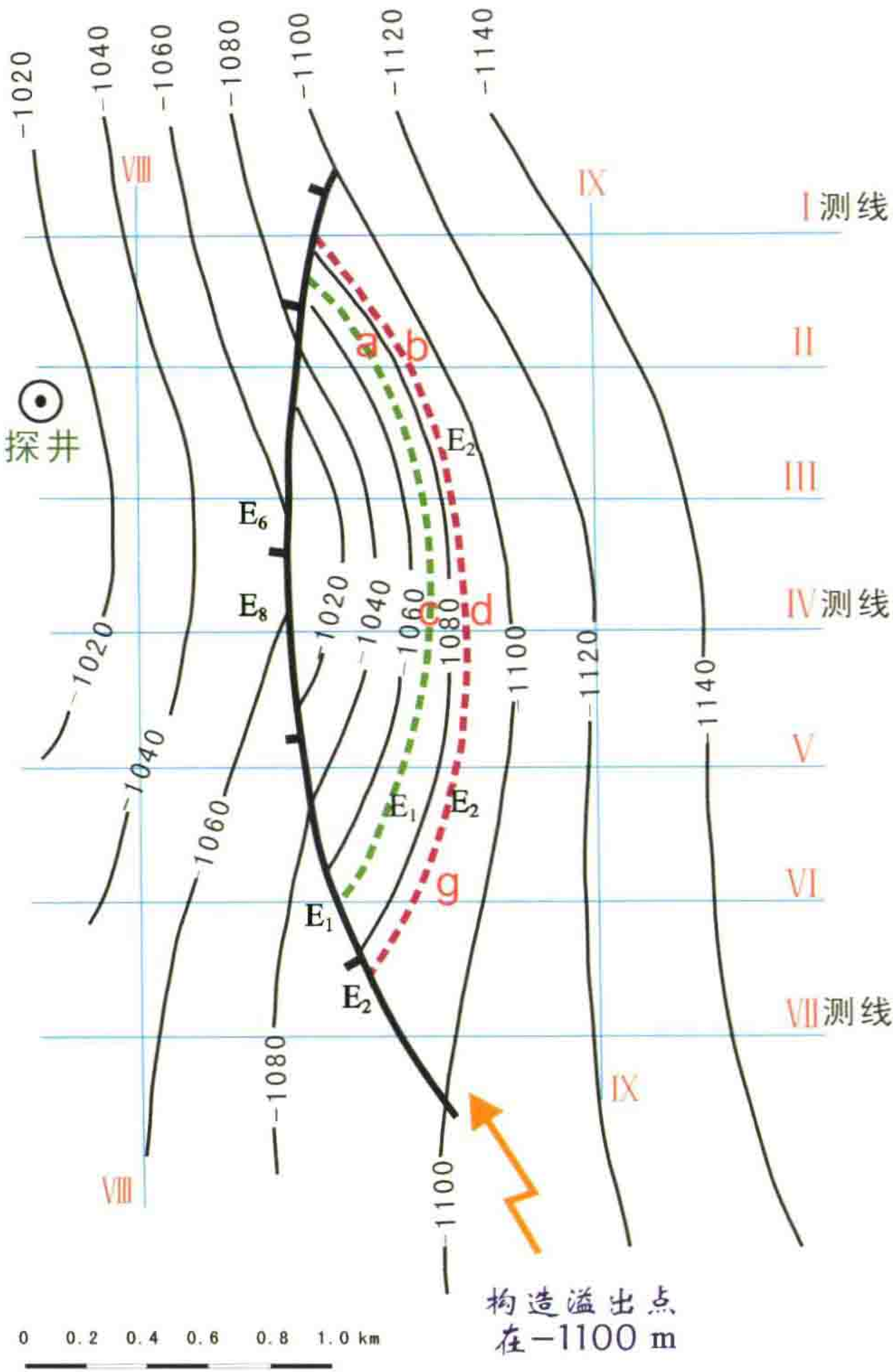


图13 断鼻构造的例子

让我们这次假定砂岩的漏失率为100%（即完全不封堵）。并且探井中的岩性柱子如图14中的模型（A）所示，有4层砂岩、1层粉砂岩，其他白色部位是泥岩（为了便于用简化图幅说明问题，所以砂层层数较少且厚度较大）。由于测区中只有一口探井，所以假定没有水平方向的岩性变化。

D　C　B　A

M_0 砂岩 粉砂岩 泥岩

25%　42%　67%　32%　含砂量

图 14　假设地层的岩性柱子模型

第一步先画出垂直断层的构造岩性剖面，如图 15、16、17。我们在微机上编了一个程序，只要输入一个岩性柱子数据，并告诉它数据大于多少为砂岩，小于多少为泥岩，介乎二者中间的就是粉砂岩，计算机自动作岩性分层。然后从构造图上每隔一定间距沿东西向在第Ⅳ主测线上逐点的读取 M_0 深度并记下其断棱位置，输入计算机，就可以由计算机绘出一条构造岩性剖面图，如图 15。

(Ⅷ) 交点　(Ⅸ) 交点

断层下降盘　断层位置　断层上升盘　M_0

砂层　ⓒ E_1 1134 m溢出

砂层　ⓓ E_2 1270 m溢出

砂层（粉砂岩）此层不封堵

砂层　1382 m溢出

砂层　1480 m溢出

1000 m　1100 m　1200 m　1300 m　1400 m　1500 m　1600 m

图 15　垂直断层走向的纵剖面(Ⅳ)测线

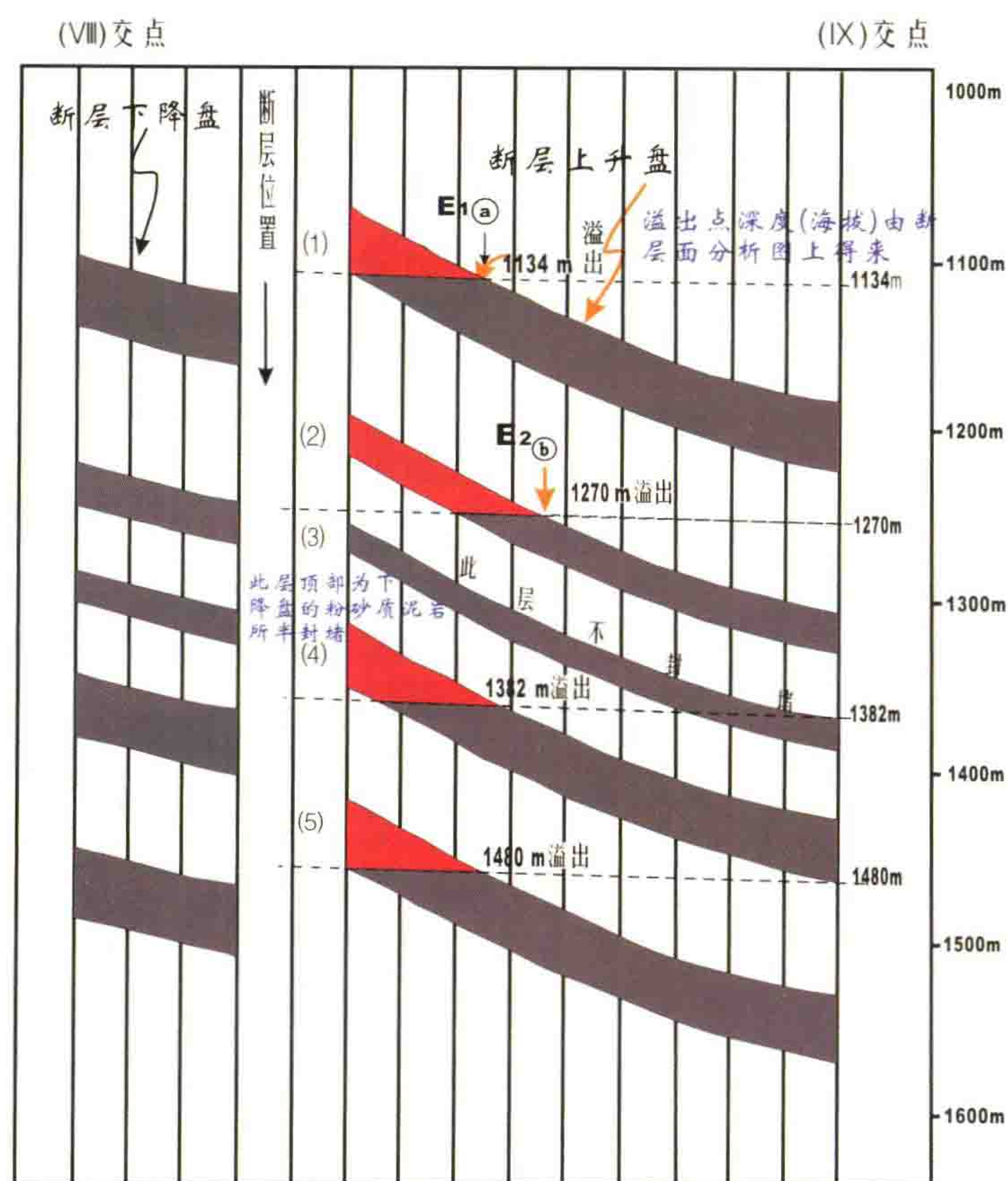


图 16　垂直断层走向的纵剖面(Ⅱ)测线

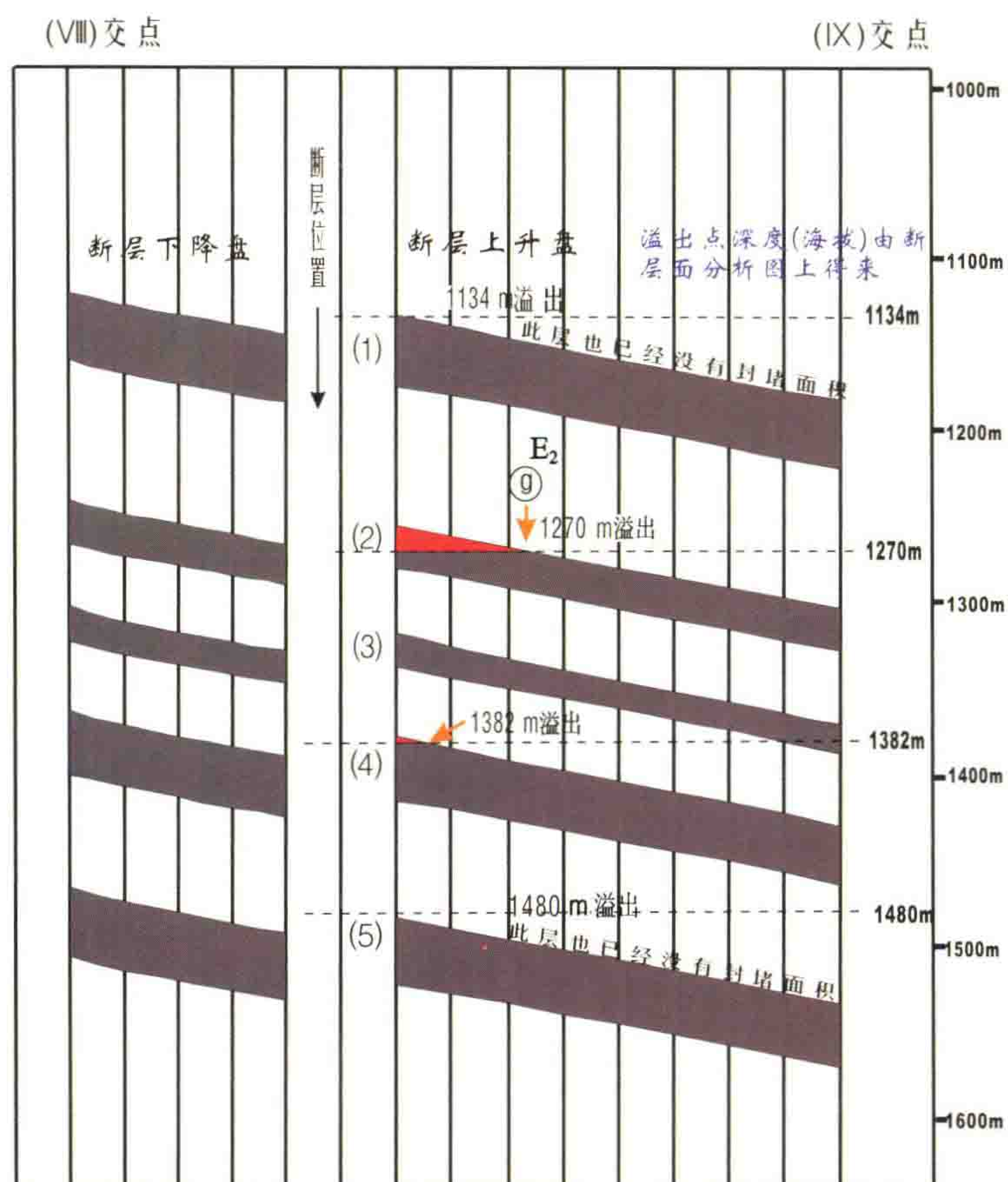


图 17　垂直断层走向的纵剖面(Ⅵ)测线

此图最上方是标准层 M_0 的深度起伏曲线。左方空白段为断层。于是你可以看到断层两侧的砂泥岩接触情况(白色部位是泥岩)。但这只是一条剖面里的情况。为此,再作出其他各测线的构造岩性剖面。如图 16、17 为Ⅱ测线及Ⅵ测线的剖面图。有了这些剖面,我们还不知道各砂层的溢出点具体在那里。必须把断层面的横剖面绘出来。由于这些地层都是向西升起的,所以我们断定每个砂层的溢出点都应该在断层面的横剖面上。

于是,分别读出构造图上断层两侧各测线上、下断棱点的海拔深度,计算机就可以自动作上升盘 U 及下降盘 D 的构造岩性剖面图,如图 18 及 19。注意两图顶上海拔是一致的(深度－1000 m)。现在如果我们将这两张图放在透图桌子上,就可以看出上下盘砂泥岩的接触情况,但是这样做很不方便。我们用计算机可以输出一条将上、下盘合在一起的屏幕上逻辑相加的显示结果,如图 20 所示。

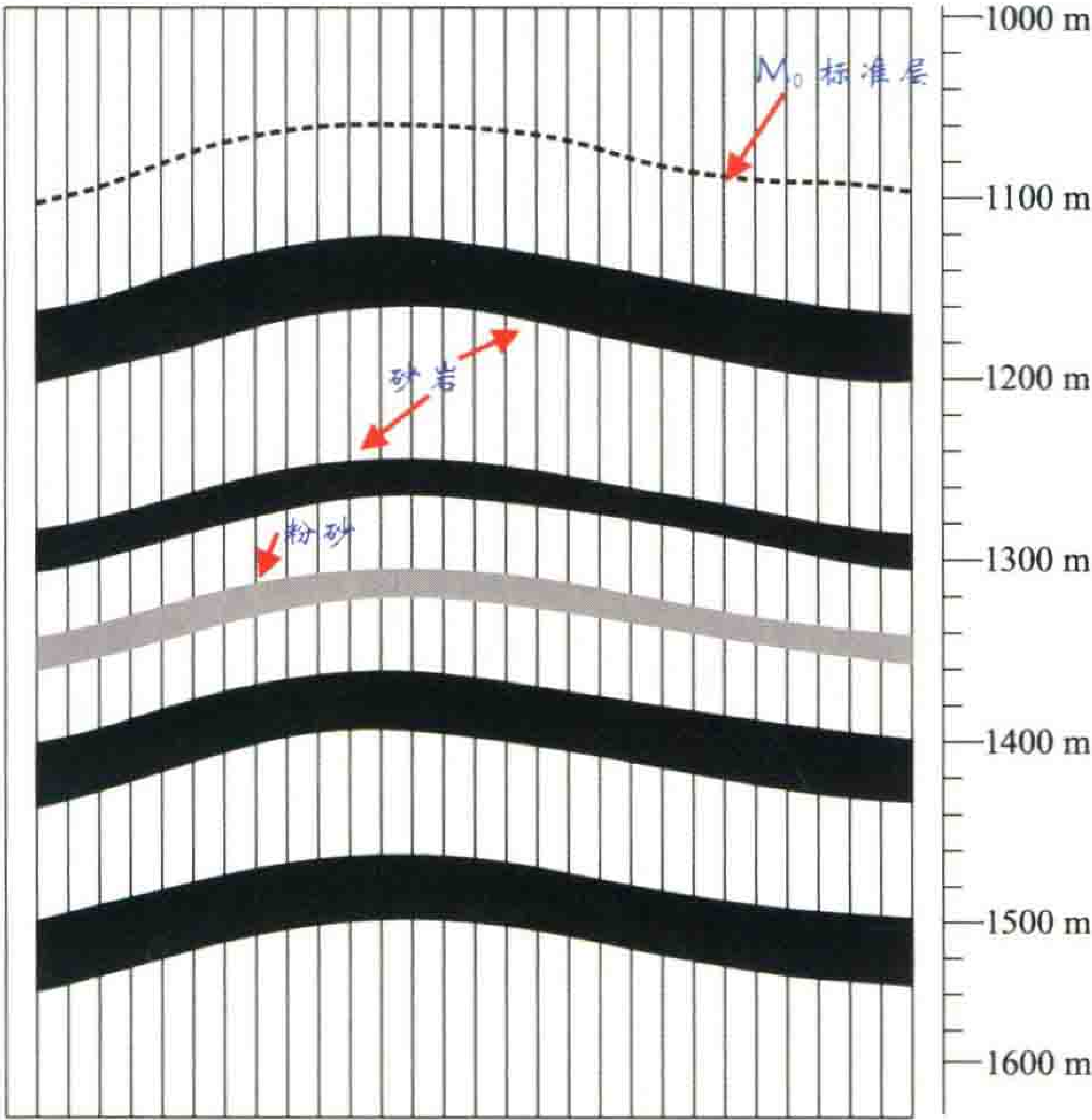


图 18　将断层面的上盘及下盘叠合在一起的情况

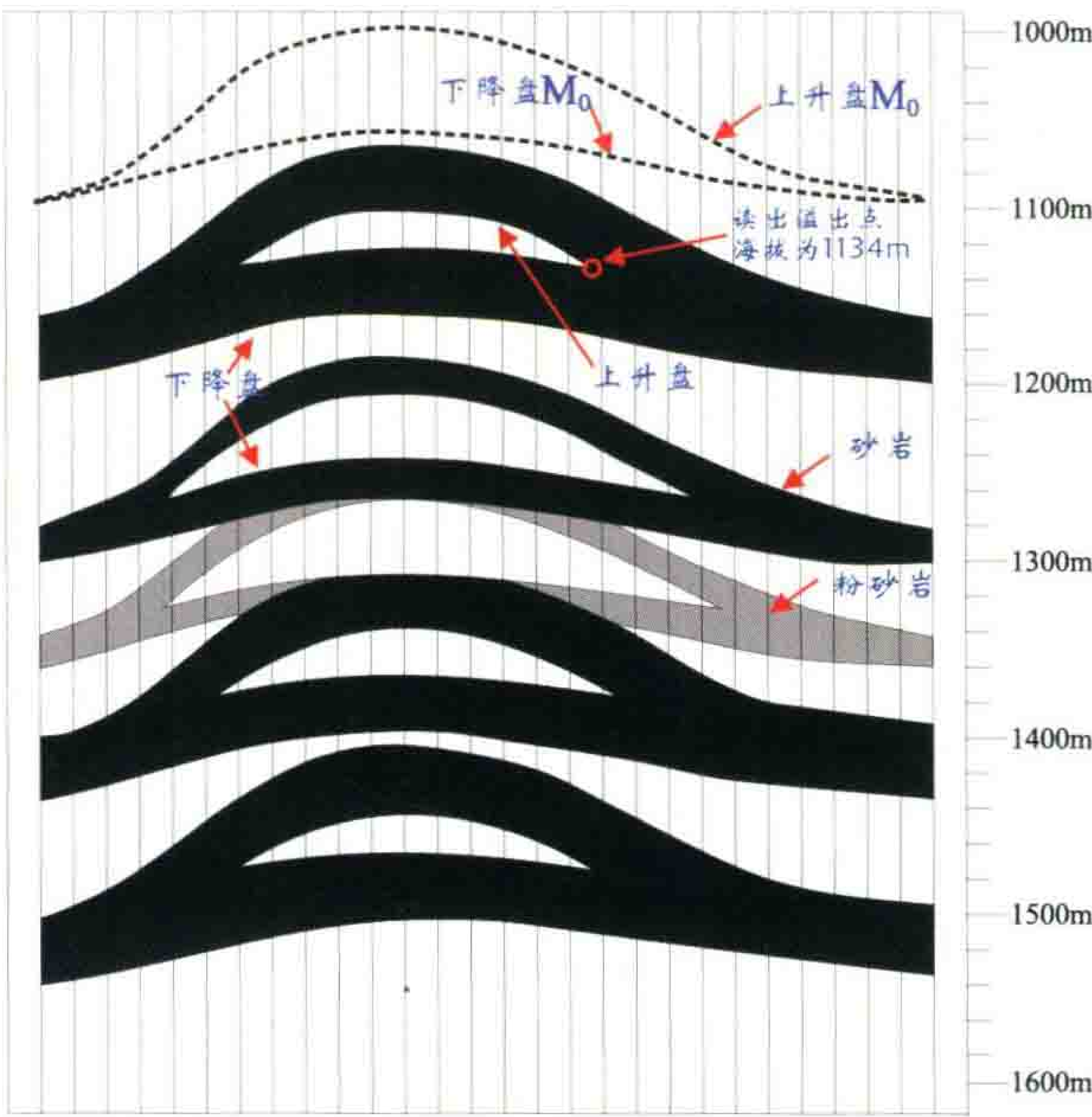


图 19　断层面构造岩性剖面图(下降盘)

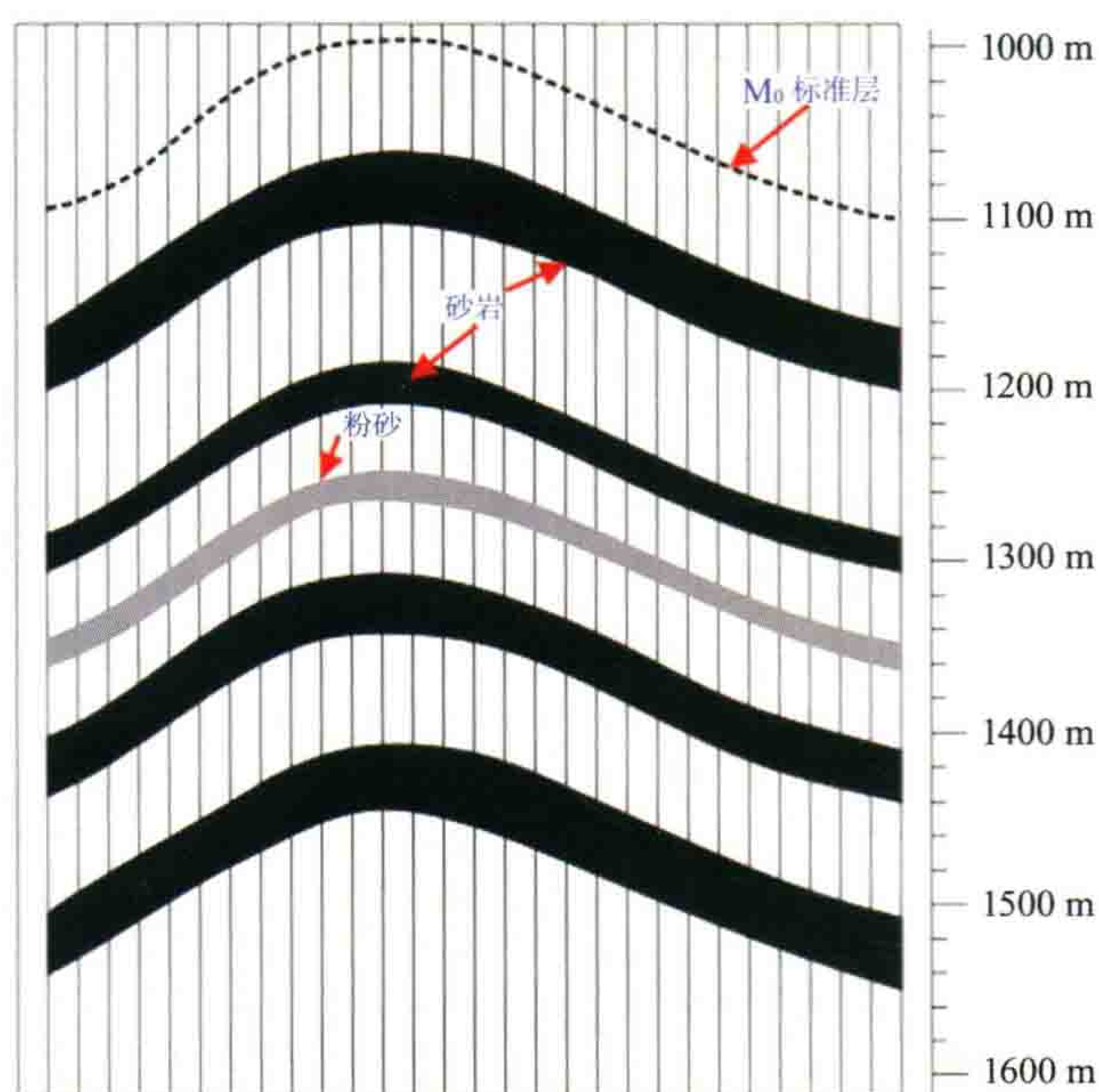


图 20　断鼻构造的断层面构造岩性剖面图(上升盘)

图 20 是以断层上升盘 U 为研究对象(即储集盘)所作出的结果。图 21 是对它作分析的断层面溢出点分析图。

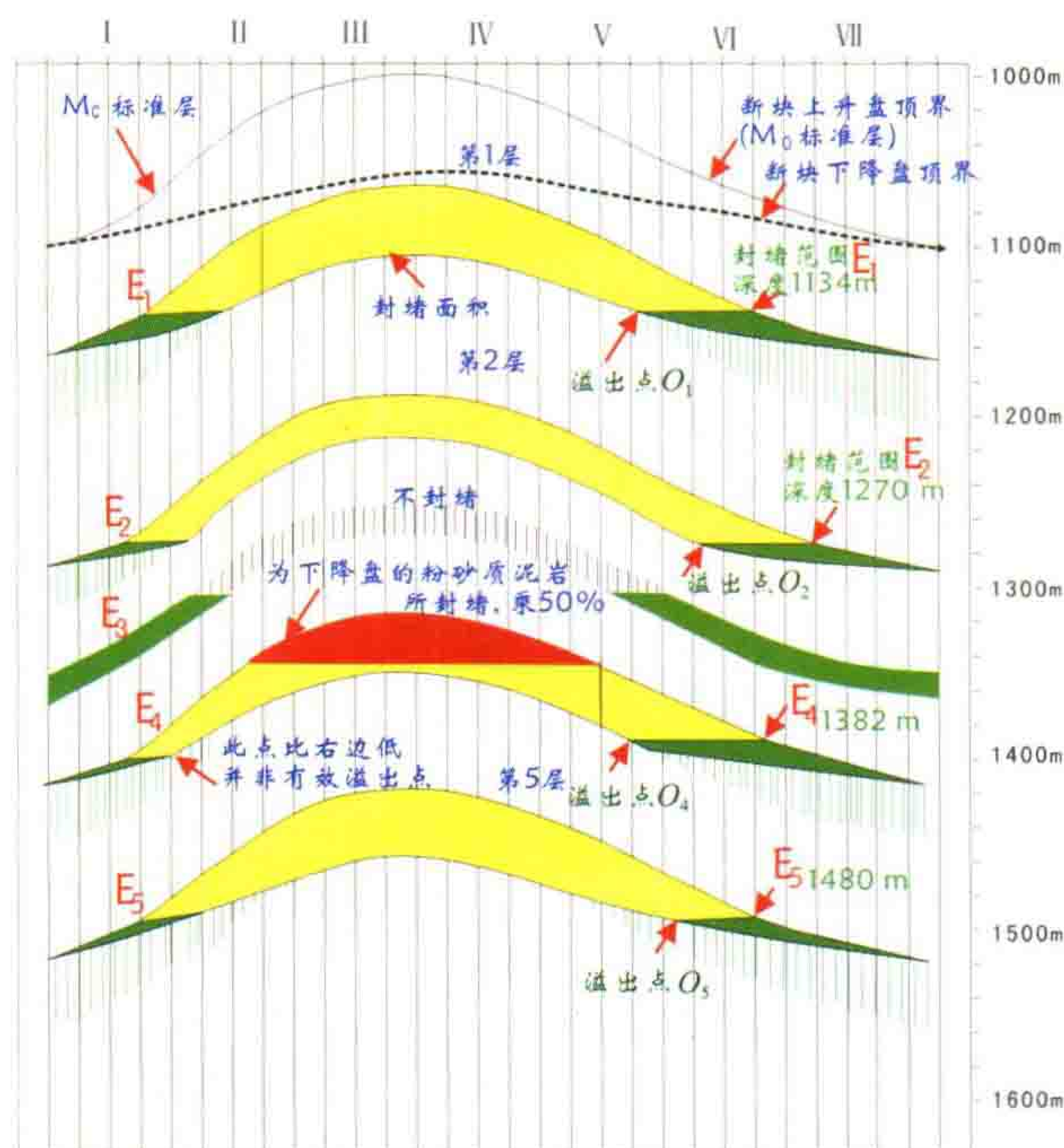


图 21　断层面上封堵情况分析图

有了上、下盘砂泥岩接触情况的图 20 之后，就可以进而分析在断层面上哪个砂层在哪些地方是被泥岩所封堵，并计算出各点的封闭量来。计算机自动在屏幕上用四种颜色及线条显示出封闭量来。金色为封闭量最好；红色其次，属尚好；淡绿色的封堵很差；垂直稀疏的绿色线条是不封堵部分；如图 21 所示。Quick Basic 有在行打印机上用黑白灰度做屏幕拷贝的功能，四种彩色相继变成：① 深黑；② 垂直密线(灰)；③ 垂直中等密线(灰白)；④ 稀疏垂线四种。(如图 35、39、45、47 等就是这种显示方法)。以上所提到的四种色调的划分是储集砂层中每个样点上的封闭量表示。它可以采用直接相乘法或逐点连乘法，对砂岩见面的地方也可由用户定义其封堵乘数不为零，这样就不排斥砂岩见面也可以含油了。最后图面上

的稀疏直线是不具有封堵条件的含水层位置，非储层（泥岩）部分在图上表示为白色背景。

图 21 上方罗马数字标出了此断层面与各测线的交点位置。由计算机绘出的这种图件称为“断层面封堵情况分析图”根据这幅图我们可以来分析每个砂层的“断层面溢出点”。

溢出点可分为两类：第一类是“构造溢出点”，它就是构造翼部等高线的圈闭底线，也就是像图 5 中构造鞍部的转折点；第二类就是所谓“断层面溢出点”，它是每一个砂层在断层面上与对方封堵盘中砂岩见面（或者说是封堵系数小于某一极限值的位置）的最高位置。例如在图 21 中第（1）砂层的断层溢出点就在 1134 m的 O_1 位置。一个砂层在左、右两方，都有可能遇到对面砂层而溢出，此时要取其中最高的一个。此例中有效的溢出点都在右边；以第（4）砂层最为明显，它的左方溢出点明显地较右方为低。所以左方不是有效的溢出点。

找出溢出点后，标出它们的海拔高度（深度），就可以把溢出点以上该砂层所占据的面积用红颜色涂满，这就是该砂层在断层面上能够装油的最大范围，也可称作封堵面积（图 21 中上了红色部分复印后就是深黑色的部分）。

第（3）砂层在隆起的最高部位已经不封堵，因此该砂层已不具备封堵条件，也就不需要再找溢出点。第（4）砂层隆起顶部遇到对面的粉砂质泥岩，它属于半封堵状态，所以找出溢出点 O_4 之后，其封堵量要打折扣（乘一个 0.5）。如果某一砂层其左、右两方都找不到断层溢出点，那么其有效溢出点就是构造溢出点。

分析完所有砂层的溢出点之后，就可以把垂直断层各剖面中的封堵面积圈定出来。例如图 15（第Ⅳ测线）中，先将图 21 中分析所得来之每个砂层的溢出点海拔高度标到上升盘砂层中去。例如对第一砂层，其溢出点在 1134 m 深度上，就将此点以上的砂层用红色涂满。此面积就是该剖面中的封堵面积。如果装满油，则油水边界 E_1 应该在（c）点处。同理，第（2）砂层油水边界 E_2 应该在（d）点处，它的溢出点海拔高度来自图 21，是－1270 m。其他砂层照此办理。其他剖面也这样做。在图 17，第Ⅶ测线上第（1）砂层已经低于溢出点之下，不能装油。只有第（2）及第（4）砂层有极小范围的含油可能。

标完各测线上的含油面积之后，就可以回过头来把这些结果再标到平面图上。在图 13 上，中央第Ⅳ测线上就可以把第（1）、（2）砂层的封堵边界（油水边界）（c）点及（d）点投到平面图上。第Ⅱ测线上投（a）及（b）两点。此外第Ⅵ测线投（g）点。可以看出：第（1）、（2）砂层的封堵边界线 E_1 及 E_2 是完全平行于原构造图的等高线。它们标出了第（1）、（2）砂层的最大可能含油范围，所以对断块油田的层状油层，实际起作用的是这种封堵边界线，而不是构造溢出的封闭底线（此例中构造溢出点为－1100 m 海拔等高线）。构造圈闭底线所圈的范围永远大于（最多等于）实际砂层的封堵边界范围。

此外，图 13 中 E_1 及 E_2 两条封堵边界线延伸到断层上就刚好和图 21 封堵面积的边界相符。例如图 21 第（1）砂层左方的边界 E_1 的横坐标位置在Ⅰ、Ⅱ测线之间，靠近Ⅰ测线 1/3 的距离处。再看图 13，的确 E_1 的平面位置与断层就相交在那个地方。

因此，其实我们不需要先去解释Ⅱ、Ⅳ、Ⅵ等测线，再用 a、b、c、d 等点来构出封堵边界线。而只需直接由断面封堵分析图（图 21）找出封堵面积边界点 E_1，E_2，再直接根据其横坐标位置，投到平面图 13 的断层线上，再由断层线上的 E_1 及 E_2 点平行于构造等高线绘出封堵边界线来（这样就可以不要去读每个砂层的溢出点海拔高度了）。这样就很简单明了。

以上例子说明了断块油田计算其剖面中封堵面积及平面上标出封堵范围的方法。

显然，每一个砂层有它自己的一个封堵范围，大小是各不相同的。你可以逐层把封堵范围绘在平面图上，如果含油，就不会超出这些范围。

最后，你可以把这个断块在深度 1000～1500 m 区间的封堵砂层总厚度绘在平面图上。先将各剖面图 15、16、17 中每个横坐标点下方各封堵砂层（已经上了红色的）厚度作累加，并将累加总厚度标在平面图上，可以构出其等厚线，如图 22 所示。最后用面积计量出各等厚线所占据的面积，就可以估算出该构造的总计砂层封堵体积。此例结果为 0.059 km^3，这就是总圈闭量。

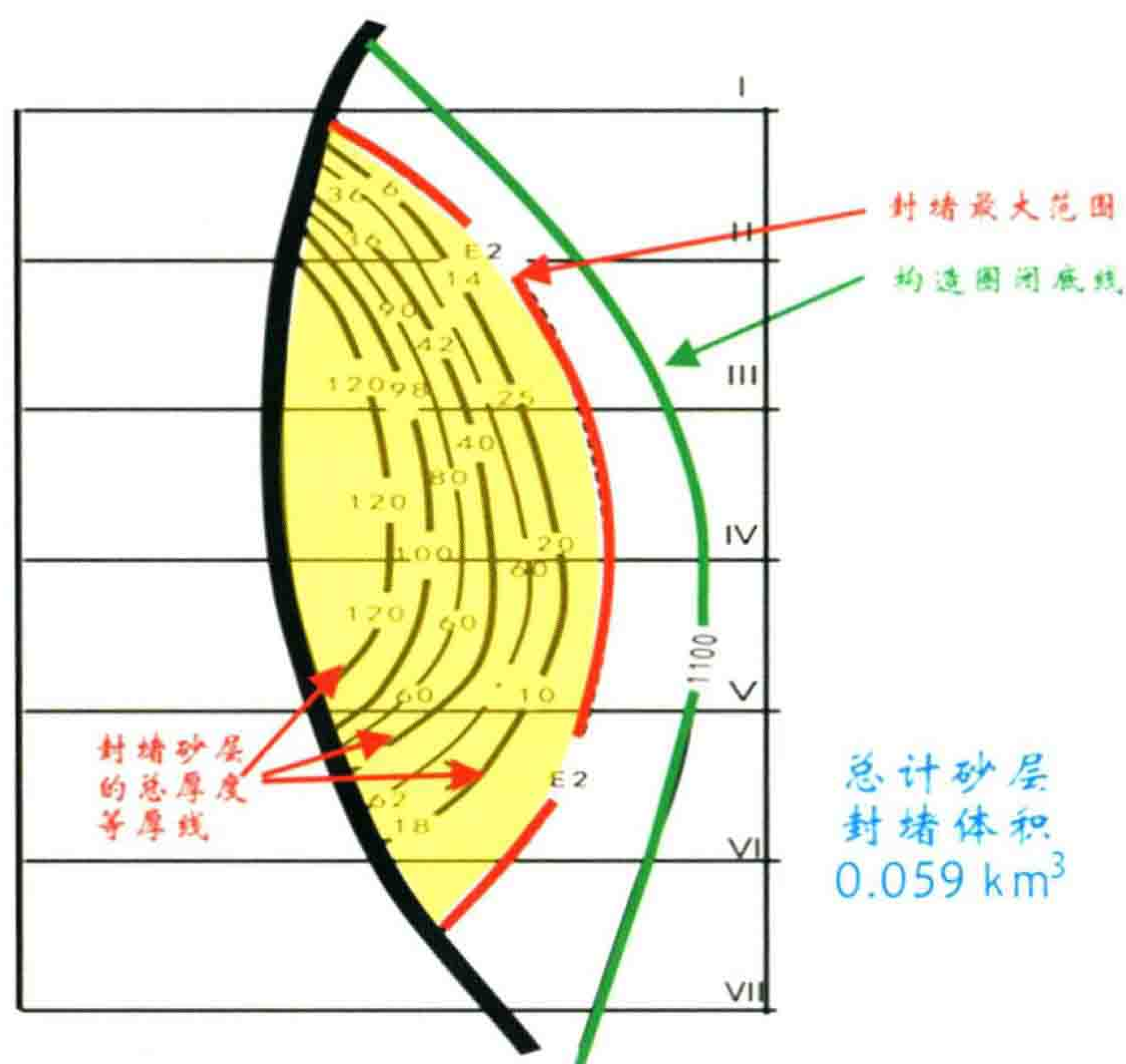


图 22 断鼻构造具有图 14 中模型 A 地层剖面时砂层封堵总体积的计算方法

（深度 1000～1500 m 井段之中）

现在假定同一个断鼻构造(图 13)，但其地层剖面不再是图 14 中的模型 A，而是模型 B，砂层更加多而密了(地层含砂量为 67%)。这种情况，这个构造的断层面封堵情况分析图就变成图 23 的样子。由此可见，这 12 个砂层基本是不具备封堵条件的。只有第(4)及第(6)砂层在隆起顶部有 2 m 封堵砂层。它的范围太窄了。其边界 E_6 及 E_8 投到平面图 13 上去，其封堵范围比指甲壳还小。此时，这个断鼻构造其封闭量是极小的，它基本上是一个"空圈闭"，只能装大量的水。

从这个例子可以看到，在砂层很发育的地层岩性剖面中，断层的封闭性极差！

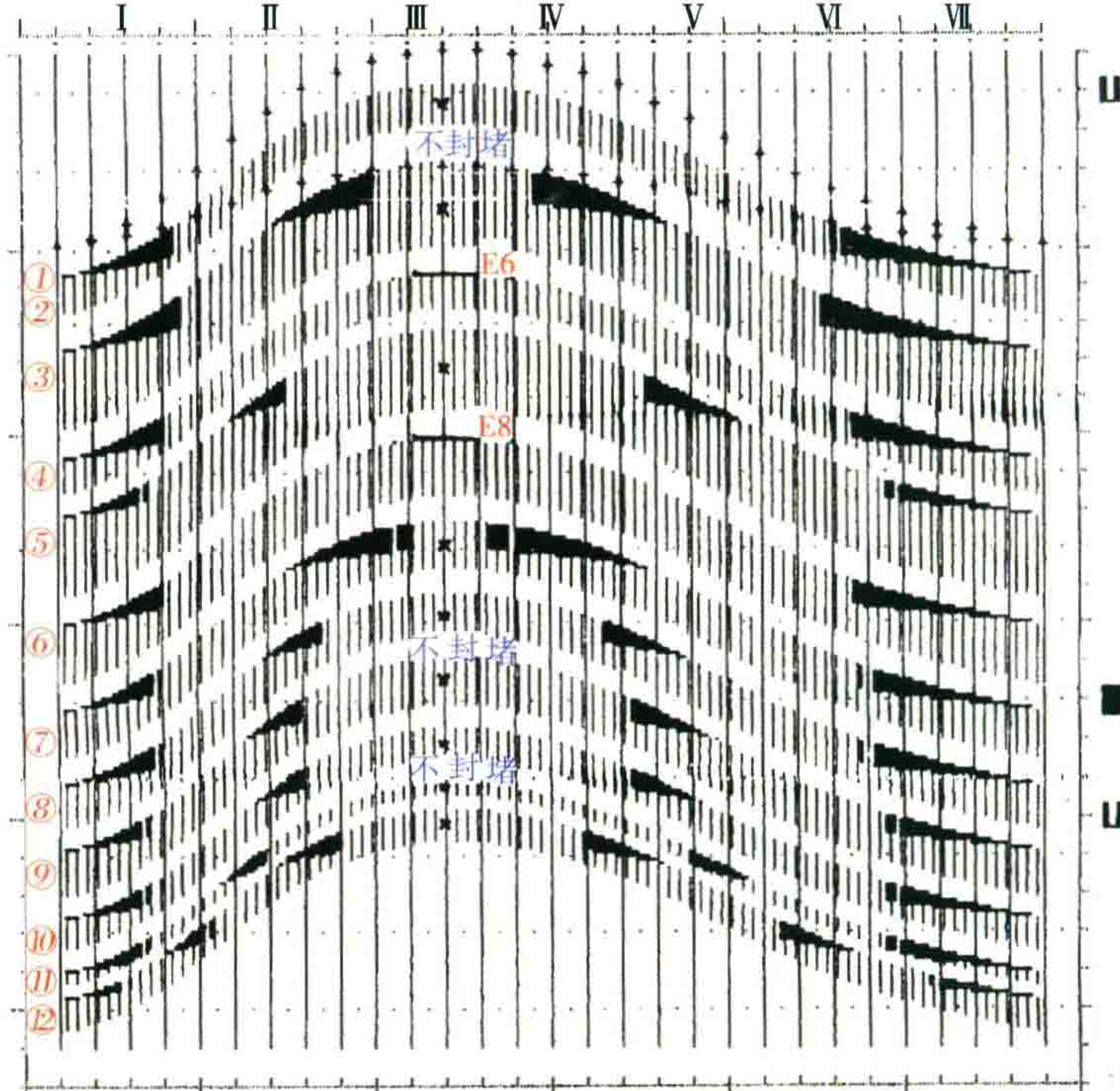


图 23 采用岩性柱子模型 B 的断面封堵情况

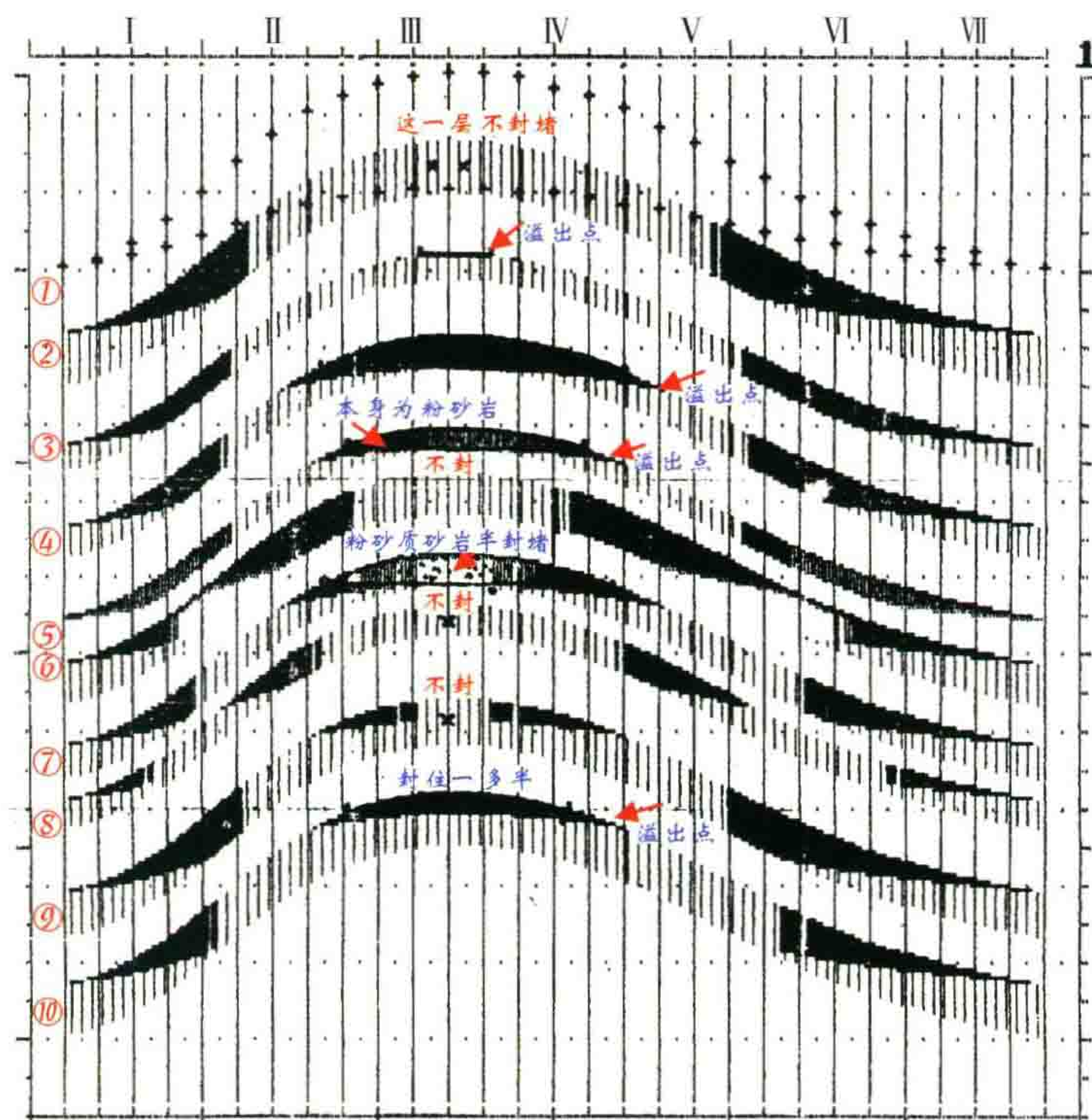


图 24 采用岩性柱子模型 C 的结果

图 24 是当地下的岩性柱子像图 14 中的模型 C 时的结果。地层含砂量为 42%，此时有一半的砂层不封堵，封堵的范围也比较小，但比图 23 强。

最后提一下，一图一井分析法所用的岩性井柱子必须是完整的、没有断层缺失的柱子。这可以从地震剖面来判断该井是否通过断层。如果通过断层，则需要通过其他井的对比，把断缺层位补齐。

七、断层圈闭其他形式的分析方法

以上分析的是简单断鼻构造的上升盘的圈闭情况。实际上断层圈闭还有其它的多种形式。可作如下分类。

按断层两侧的地层面产状来作划分，正断层可以分为两类，参见图 25。(A)当断层两侧的地层倾向(符号)相同时，称为同向断块；(B)当两侧地层的倾向相反时，称为异向断块。

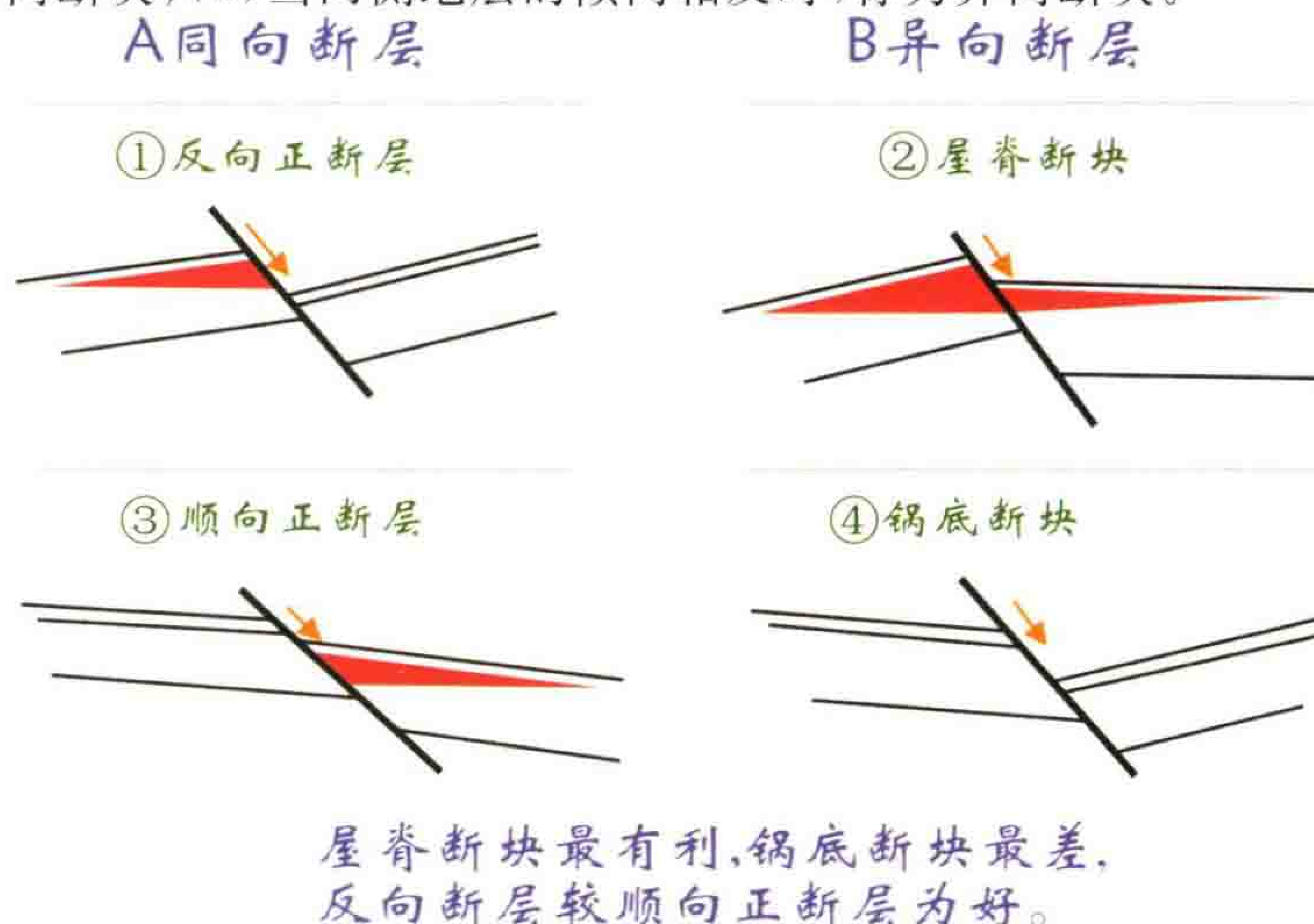


图 25 断块的分类

在同向断块中又可进一步根据断层面的产状划分为两种圈闭类型。

① 当断层面倾向与地层面倾向相反时称为反向正断层，这类断层圈闭形成在正断层的上升盘，多发生在隆起构造带上；② 当断层面倾向与地层面倾向一致时称为顺向正断层，它所造成的圈闭形成于正断层的下降盘，如图25②，常常发生在斜坡带上。

对于异向断块，也可以进一步根据其两侧形态进一步划分为两侧拱起的屋脊背斜断块，如图25③；以及两侧下陷的锅底向斜断块，如图25④所示。

这四种断层形态的圈闭性能是有很大差别的。背斜型的屋脊断块最有利，反向正断层的高部位其次，顺向正断层差一些，而向斜型锅底断块最为不利（岩性圈闭除外）。

关于反向正断层（上升盘）及顺向正断层（下降盘）的封堵情况，我们做了一些封堵条件的试算，参看图26。**我们发现的小落差的条件下（落差小于砂泥岩单层厚度时），反向正断层的上升盘始终具有封堵的性质，并且封堵量与落差大致成正比**，如图26右上方落差3～15 m区间。**相反，对于顺向正断层的下降盘来说，只要落差小于单层砂泥岩厚度时，就会与对面砂岩见面而不容易封堵**，如图26下图右方所示（此例中所用的地层岩性柱子为图14的模型A，封堵量是用连乘方法所得）。

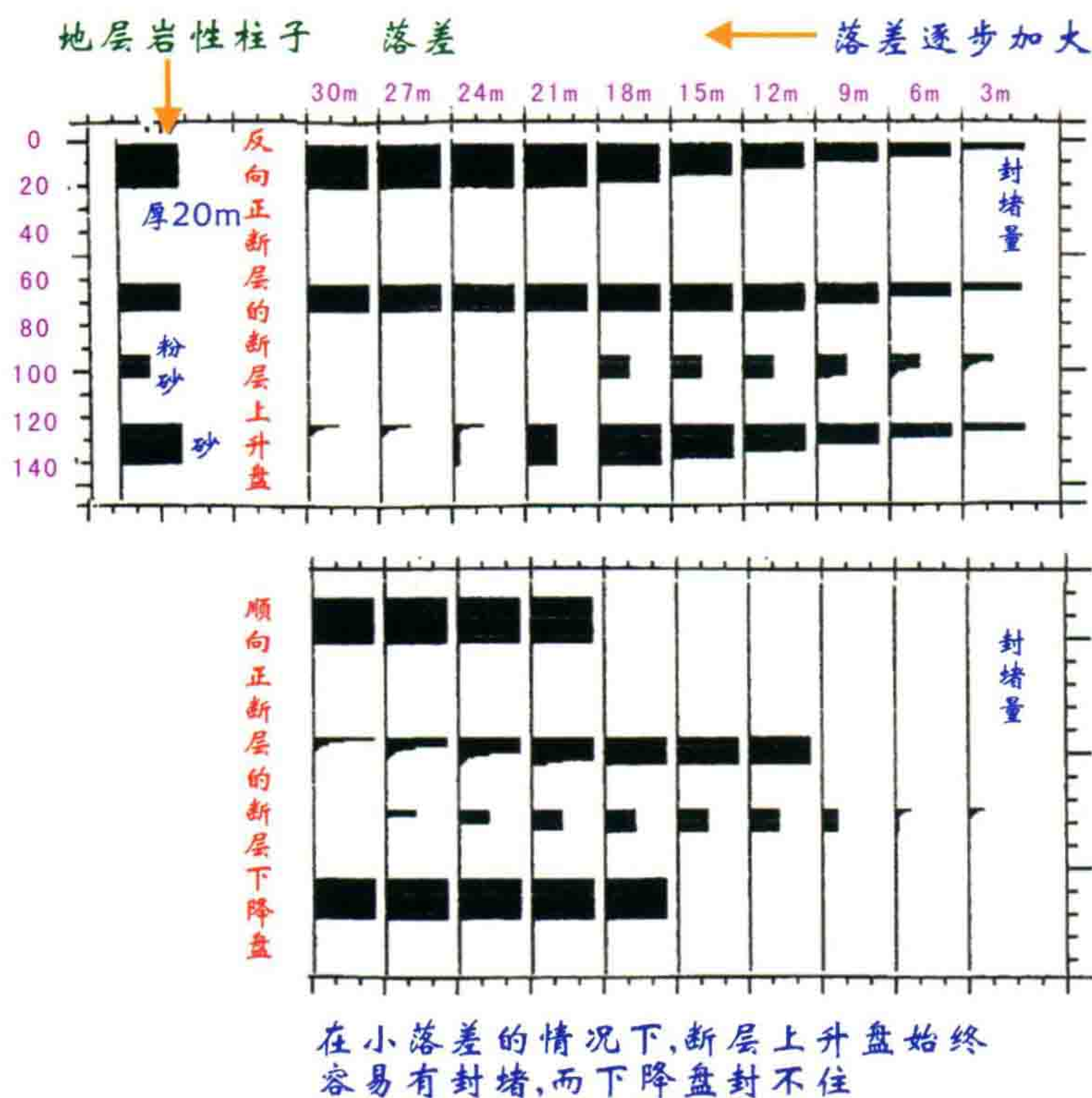


图26 不同落差时的封堵量变换情形

小落差的断层虽然用地震勘探方法不容易被发现，甚至在一般地层对比研究中也容易漏掉，但在华北地区这种小断层还是比较多的，不少大断层附近也派生了许多小断层，所以反向正断层的断块高点在含油性方面往往比顺向正断层的下降盘为好。

造成这一优劣差别的另一个因素可以参看图27。这是断层下降盘D一个断鼻构造的断层面封堵分析图。它与图21是可以作对照的。由此可以看到，下降盘所封堵的面积及范围远较上升盘为小，因为下降盘的断层溢出点都在每一个砂层的上方出现（如图27中的O_1、O_2及O_4）。所以它们的封堵面积要比图21小得多。*

* 有人说生长断层的下降盘比上升盘含油更丰富，那是因为在那种断层的前面，存在着滚动背斜的原因。没有背斜，就不见得有利了。

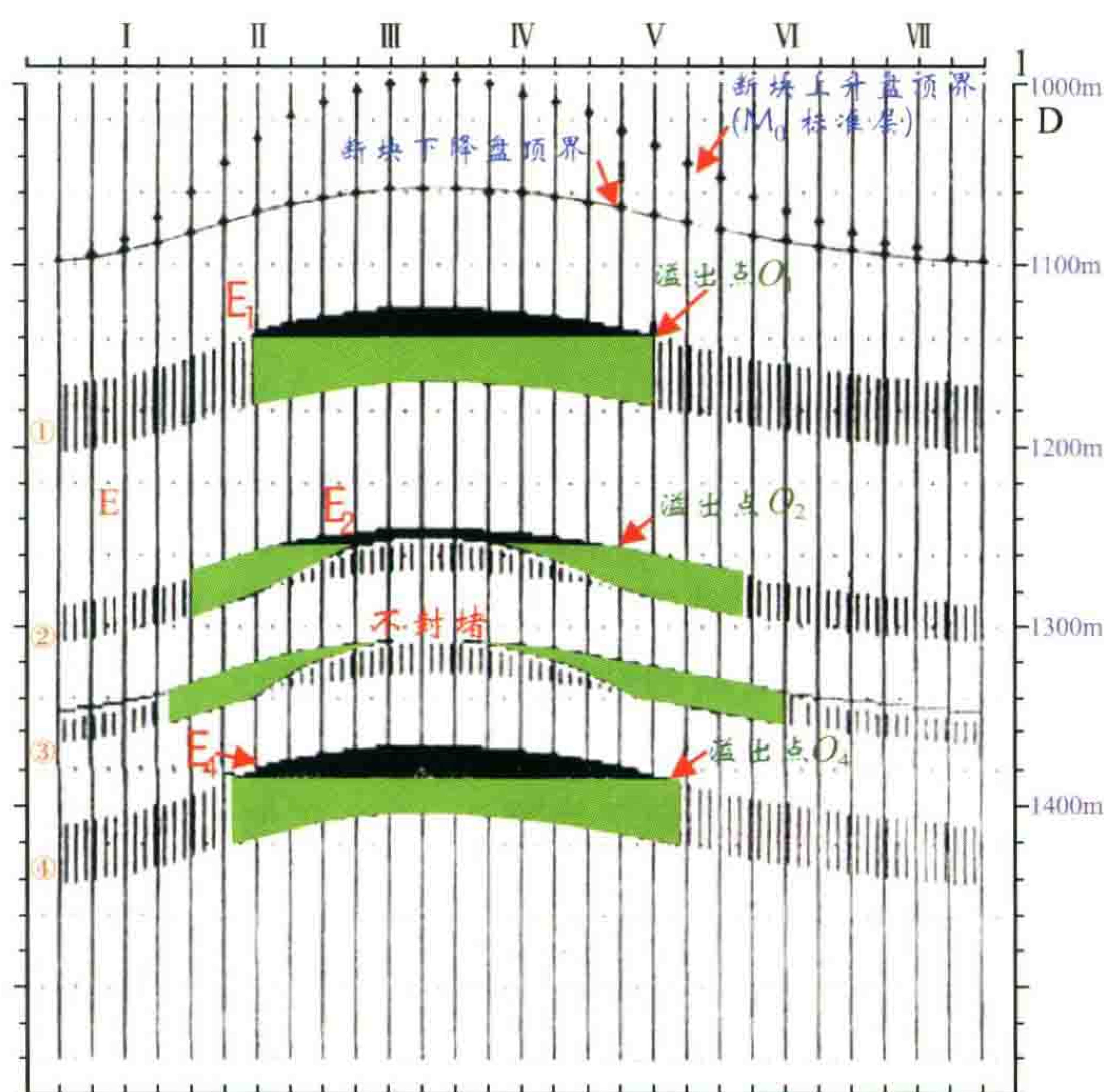


图 27　顺向正断层下降盘鼻状构造的段层面封堵情况分析图

当落差远大于砂层厚度时，顺向正断层和反向正断层就没有太大的差别。此时，圈闭量完全取决于砂泥岩的组合情形。

我们做了些试验，发现当砂、泥岩间互层有较明显的周期性时，断层圈闭量随着落差的加大而呈周期性涨落。没有明显周期性时，圈闭量与含砂百分比有着某种统计性规律。

图 28 就是我们采用许多没有明显周期性的砂泥岩互层的岩性柱子，在落差远大于单个砂层厚度时的统计结果。这是对断层封堵的一维分析。

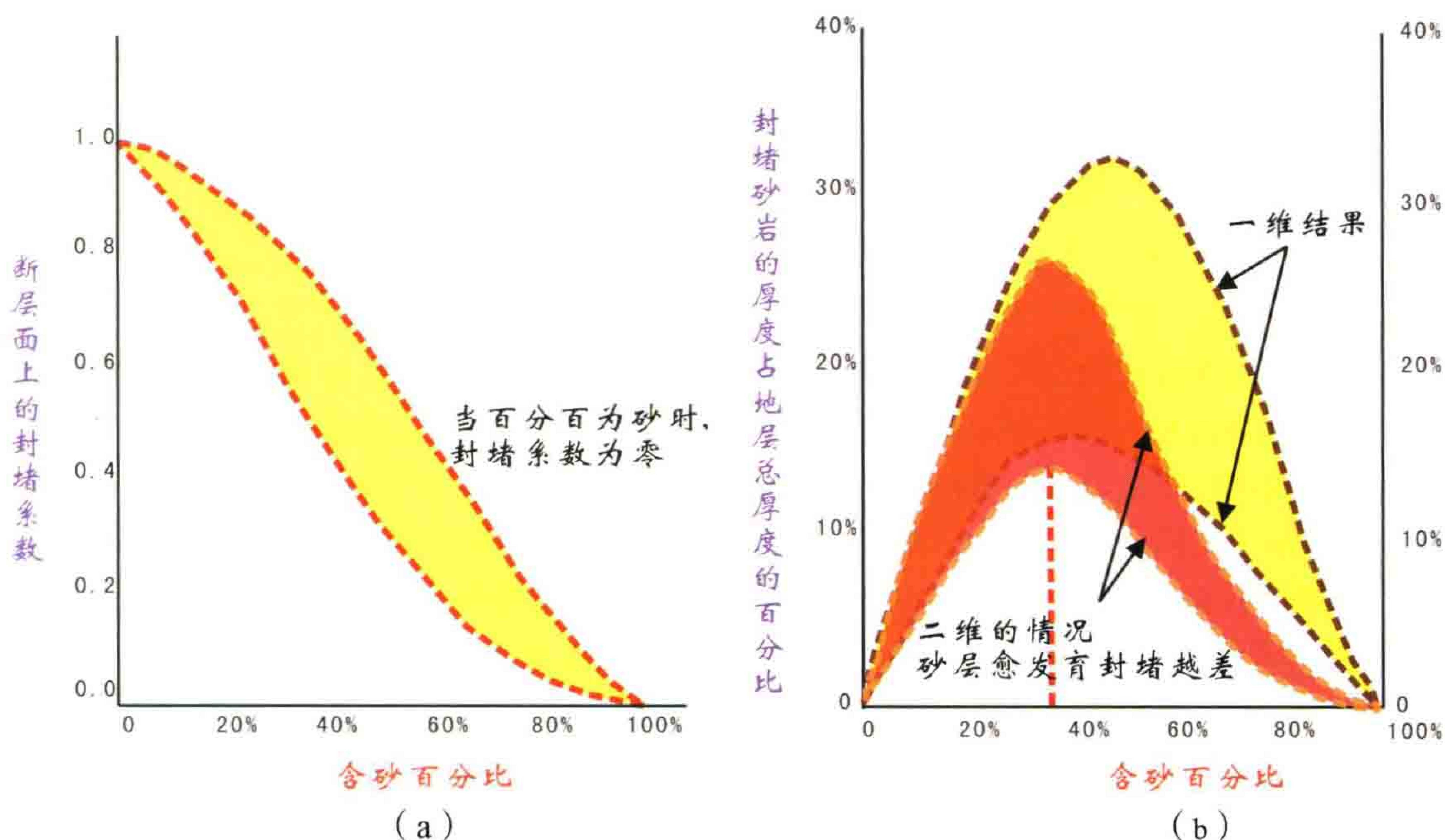


图 28　落差大于砂泥岩厚度的情况下断层面封堵系数、封堵量与含砂百分比的统计规律

横坐标是地层含砂百分比，从 0～100%。其中图 28(a)的纵坐标为断层面上的封堵系数，图中纺锤状

的图形是计算机许多次试验的离散点分布范围。该图说明断面上的平均封堵系数在100%泥岩时为1。当含砂量百分比增加时，离散度变大，但总的是与含砂百分比成反比地下降，最后100%砂时下降到0。

图28(b)的纵坐标是封堵砂岩的厚度占地层总厚度的百分比，也就是平均的封闭量。可以看出当100%泥时，封堵虽好，但由于没有储集层，封闭量还是等于零，而100%是砂时，没有封堵，也是等于零。只有在砂泥岩各半时，其封堵量达到最大。

考虑到在二维情况下，一条断层的落差是横向不断变化的，因此，由于平面中断层面上由于落差的多变，会造成更多的不封堵。这种情况，含砂量愈多愈不利，因此最终结果如图中橘红色(弓形)所示。

这张图也说明了砂岩百分比在30%～40%时，最为理想。要找储量大的断块油田必须要到砂岩体前缘去找。就像大庆油田的萨尔图到葡萄花，那里的岩相带基本上是属于三角洲相带。这是从断层封闭角度分析所得之结论，它和我们多年来勘探实践的经验是完全一致的。

2000年10月中海油南海东部公司陈长民总地质师邀请我参加他们在番禺莲花山度假花园酒店召开的"断块油田勘探方法技术座谈会"，会上我介绍了我写于1978年的本书书稿内容，当时就引起了与会的石油地质家的浓厚兴趣。东部公司拿出了他们在砂岩百分比在30%～40%地域找到一大批油田的图幅，使人感到与我上面的结论是惊人地吻合(图29)。

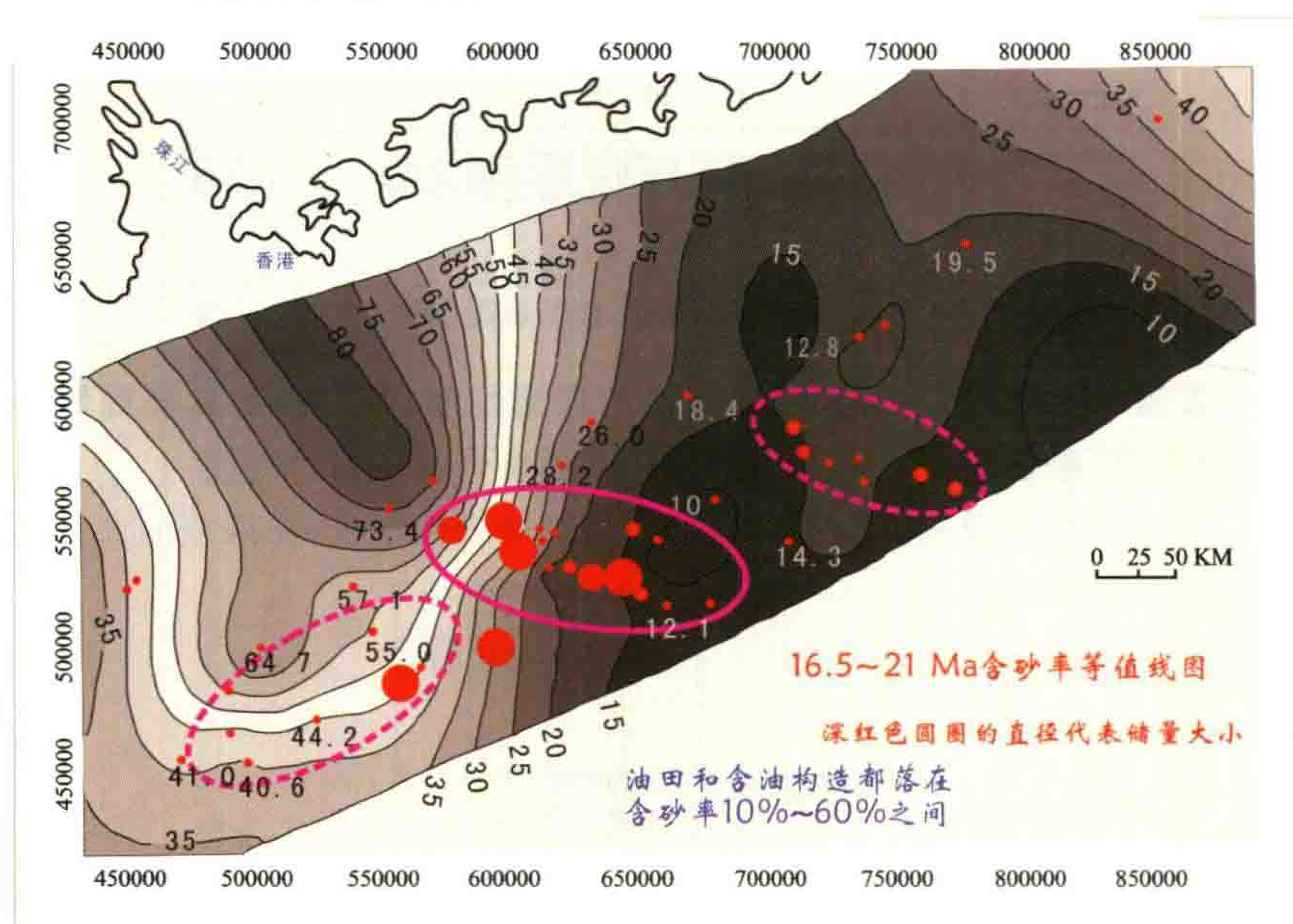


图29 珠江口盆地东部地区含油构造的分布与含砂率关系图

屋脊断块显然是所有断块中最有利的。因为此时砂层见面也可以装油，并且油气的纵向与横向运移路径最后都指向屋脊断块。

复杂断块的圈闭分析方法可参看图30及图31。

图30(C)表示了这样的一群屋脊断块群。分析时，也是要切许多剖面，绘出其岩性及构造形态，分析其砂层的连通情况及溢出点位置。但其中最重要的两条剖面就是横切背斜高点的东西向断层，和通过构造最高点构造(鞍部)溢出点的剖面。

对于四周都被断层包围的封闭断块，可按如下方法分析其封堵情况。例如，图30(C)左下角的长方形断块，可按其四个角a、b、c、d，将四个断层面作盒式展开，就像图30(D)那样，先把作图标准层M_0的断块里及断块外的高程标出来，如实线及虚线所示。然后将岩性柱子放上去，既绘出断块里的岩性，又重合上断块外的岩性。用我们所编的程序，就可以绘出封堵情况分析图。

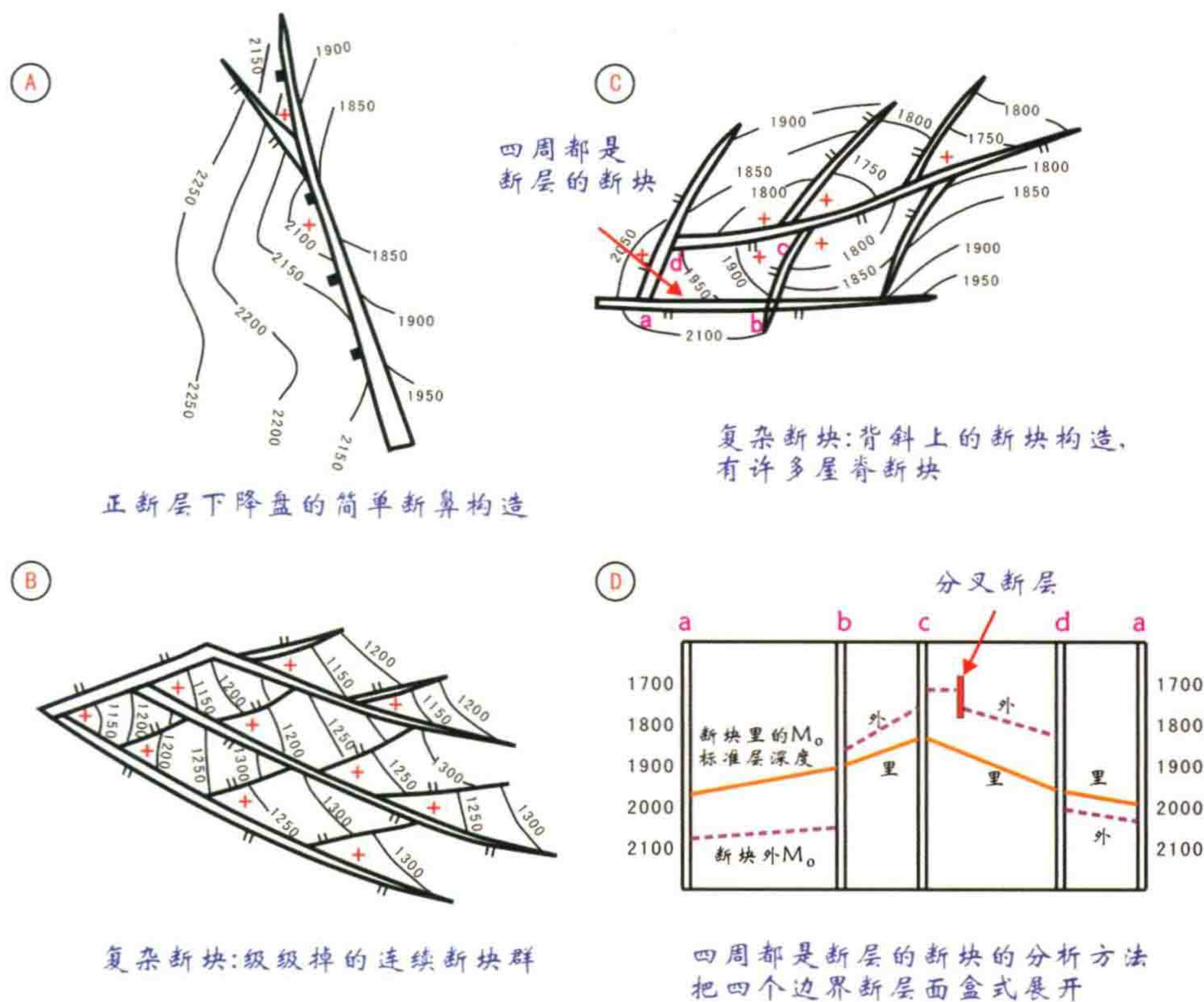


图 30 复杂断块圈闭分析的盒式展开法(单位 m)

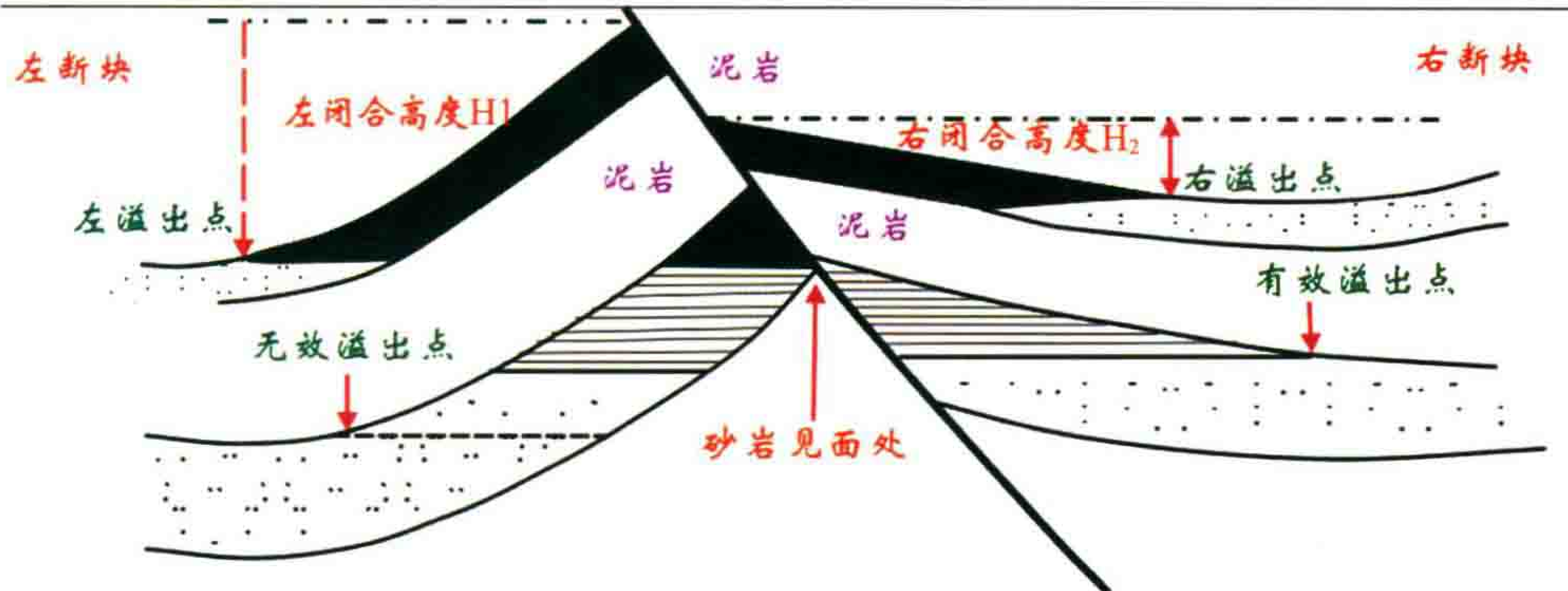


图 31 背斜顶部屋脊断块的圈闭分析方法

对于屋脊断块的情况,如图 31 所示,分析的时候要注意两点:凡是砂岩不见面的储集层,都各自按各断块自己的闭合高度划分封堵面积;凡是左右连通的砂岩,只能按左右两个溢出点中较高的一个,作为有效溢出点。

以上讲的分析方法都是就一个断块而言来作分析的。但是如果断块很多,很复杂,就像图 30(B)那样,是级级掉的连续断块群,那么就会有复杂的封堵串联现象,如图 32 所示。图中左方 A 断块的一个砂层与 B 断块的砂层见了面,但是幸亏 B 断块的上倾方向为 C 断块的泥岩所封堵,于是 A 断块这个砂岩也会与 B 连通形成一个共同的封堵面积。

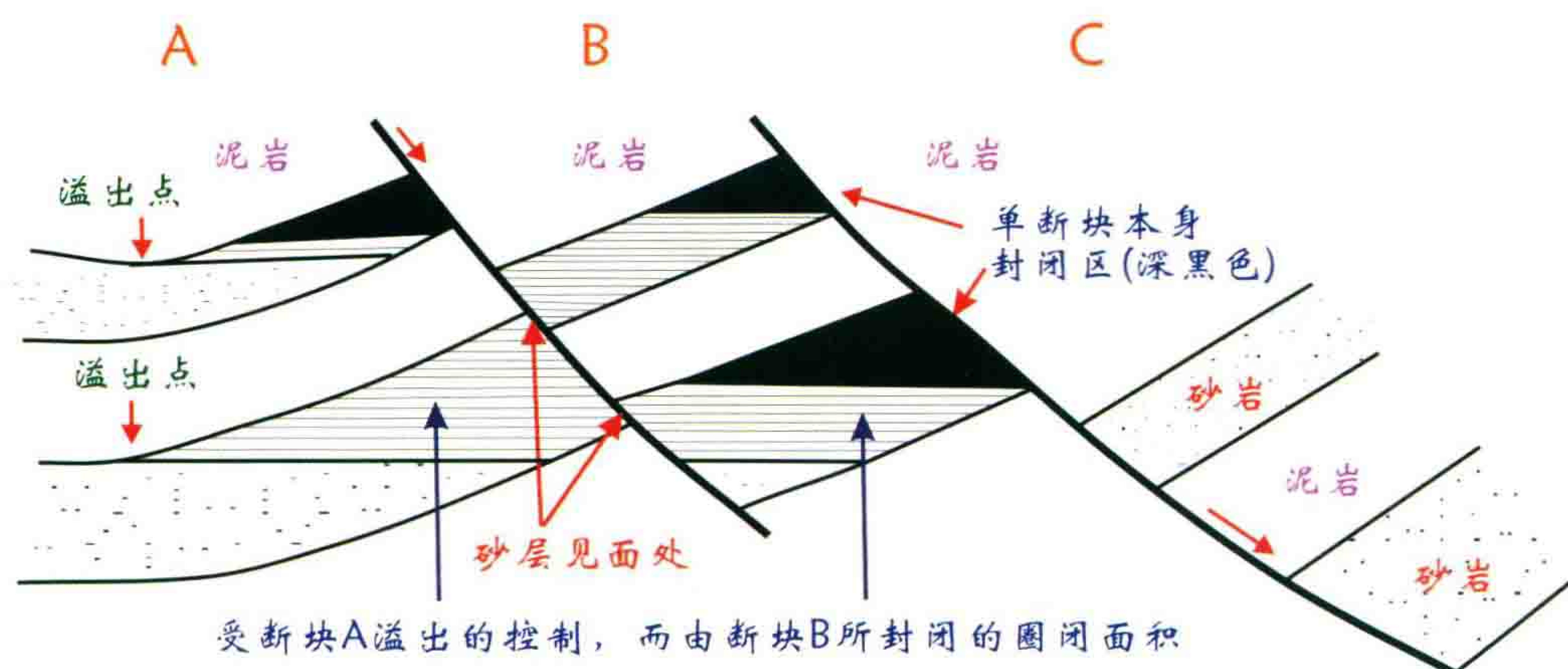


图 32 连续断块的封堵串联情形

这种情况，只有把研究区中，纵横作较密集的构造岩性剖面，才能搞清其实际封堵情况。所作的构造岩性剖面越多，也就会把问题搞得越清楚。

这样，作图工作量及分析工作量就十分巨大。作为一种变通的办法，可以先将各断块单独作分析，绘出其砂层不见面的区域面积，如图 32 中，涂深黑色的部分是单断块本身所封堵的面积，将这作为对断块圈闭量的初步估价(这是最牢靠的部分)。然后再辅之以贯通全区的长剖面，进一步绘出如图 32 中密集横线条的那一部分砂岩见面而前方封住的面积，从而对串联圈闭的总的圈闭量作出一个较全面的估计。*

以上内容将断块油田的圈闭分析方法介绍完了，笔者在此还想指出下列事实。油气的运移及圈闭是一个极为复杂的问题，每一种简化了的解释方案都会遭遇到与事实不符的例外的情形。例如，有时完全不封堵的边缘粗相带，尚会由沥青封闭而形成油藏(如克拉玛依油田)；在原油运移途中，有不断补给的渗漏砂层中也还可以保留油藏，就像向漏斗中不断倒水时，漏斗也可能装满水的情形一样(如洑阳油田里的白庙气田)。因此，重要的是只要一种方案能解释大多数情况下的客观规律，它就不失为一种实用的方案。我希望我所介绍的方法能起到这样的作用。

八、实际应用的例子

(一) 广利油田

山东省东营凹陷中广利油田南部的莱 1 断块，是一个较简单的断鼻构造，现已投入开发，见图 33。油田北部有一条控制断层，它在各地震测线上测定的落差值已标记在断层上。该油田的地层岩性柱子如图 34 所示。产油层为沙三段油页岩集中段下方的沙三下段广利油层以及沙四上纯化镇组的一部分砂层。

---

* 读者看完这段后，一定以为复杂断块的圈闭量太难于估计了。但是我想告诉读者的是，我们的三维空间圈闭分析程序调通后，不管三维空间砂岩连通体有多么复杂，计算机将自动地寻找串联圈闭的总的圈闭量，不再令人伤脑筋了。

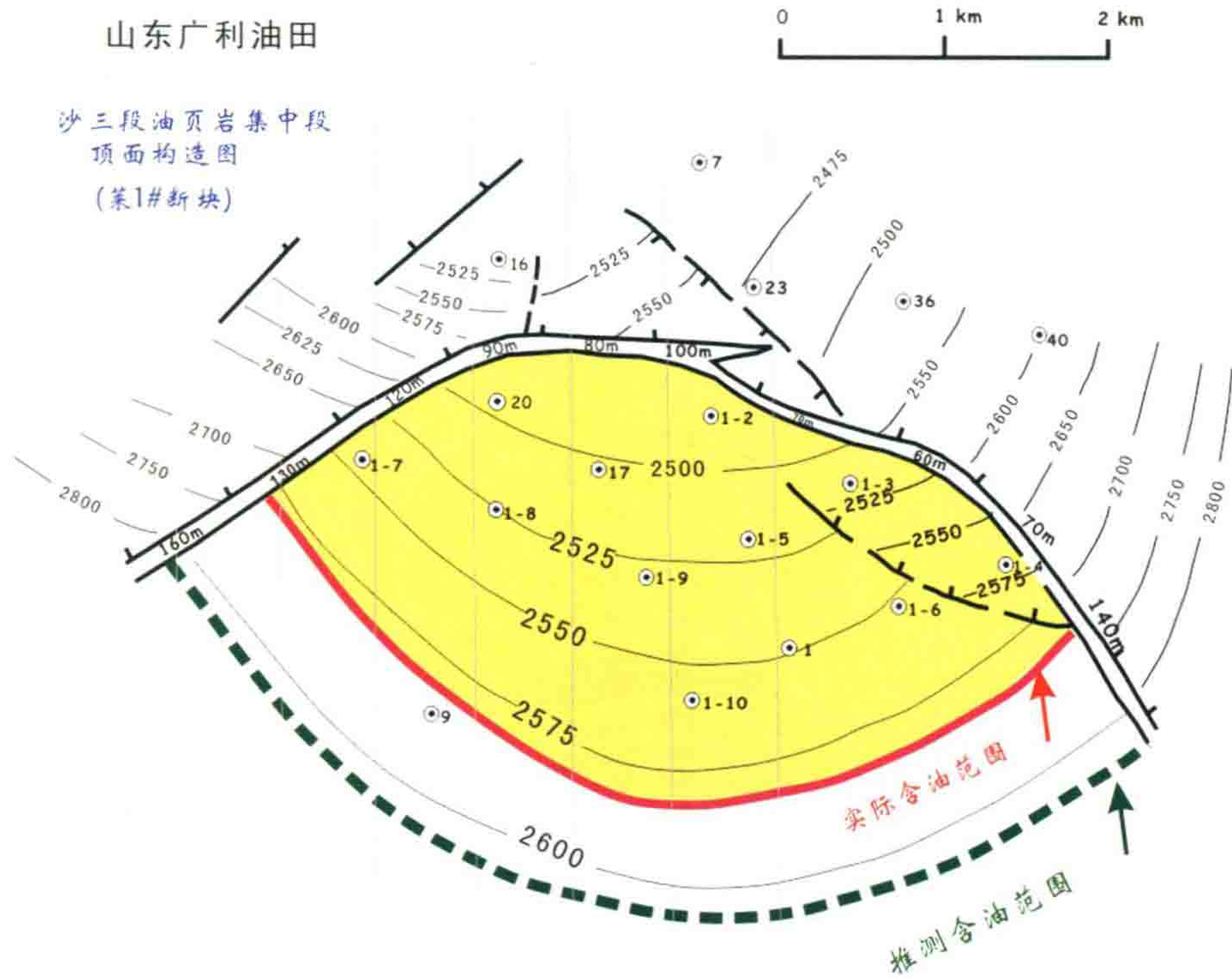


图 33　山东广利油田沙三段油页岩集中段顶面构造图

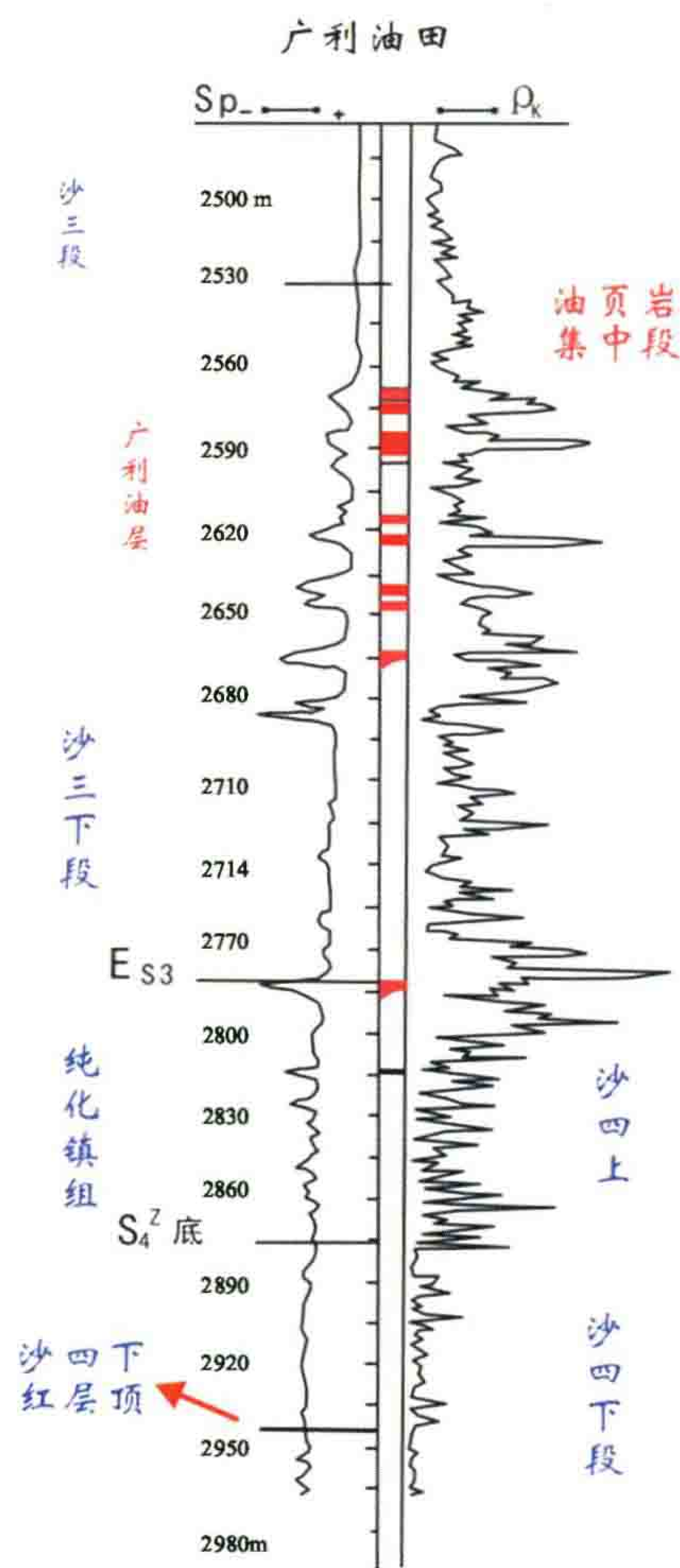


图 34　广利油田某岩性柱子

假设当时只有地震资料及一口探井井柱子，我们根据一图一井法，作出了北部断层面的上、下盘构造岩性剖面图，见图35、36。图37是断层面封堵分析图，涂黑色的是砂层的封堵部分，浅灰色是封堵较差的部分，直杠杠是不封堵的部分。从图看出，上部广利油层有5层砂岩的封堵范围很大，图中所标溢出点为边部构造溢出点。在图37的中央部分出现上油下水，这与图34广利油层下部出现油水同层及水层的情况基本相符。在图33中，绘出了我们推断的含油范围和实际含油范围两条线。可见这个效果算是不错的。

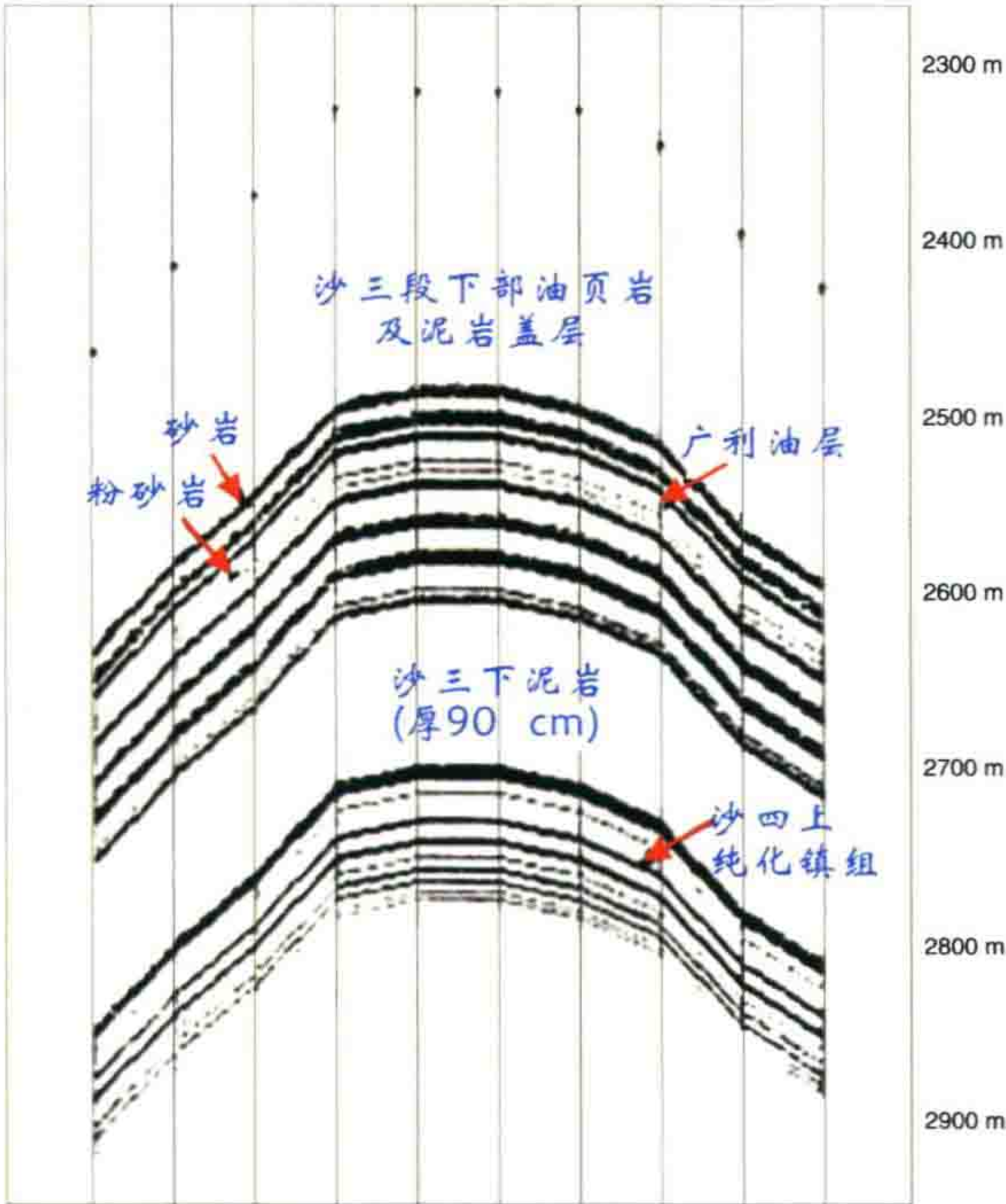


图35 广利油田上升盘构造岩性剖面

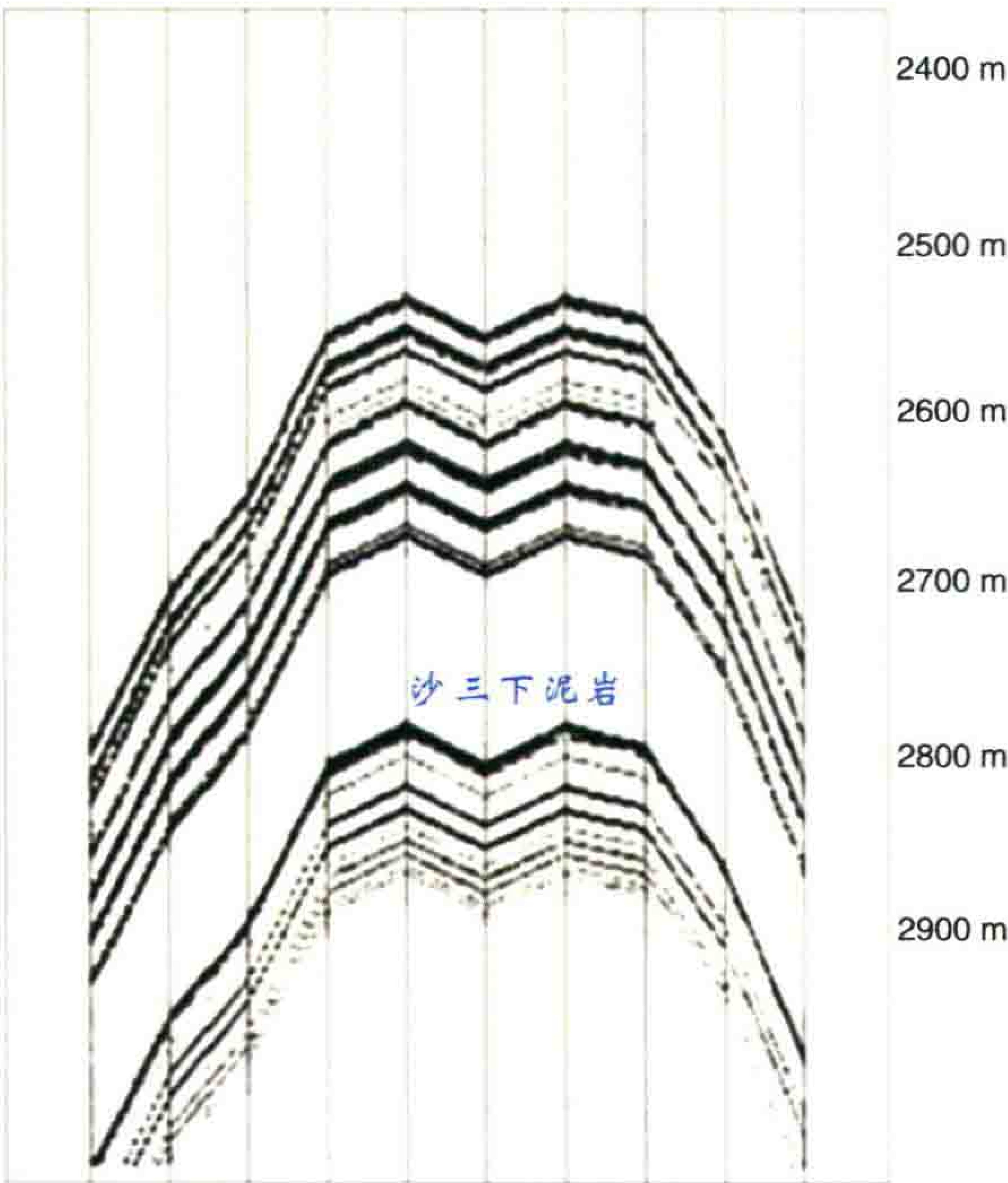


图36 广利油田下降盘构造岩性剖面

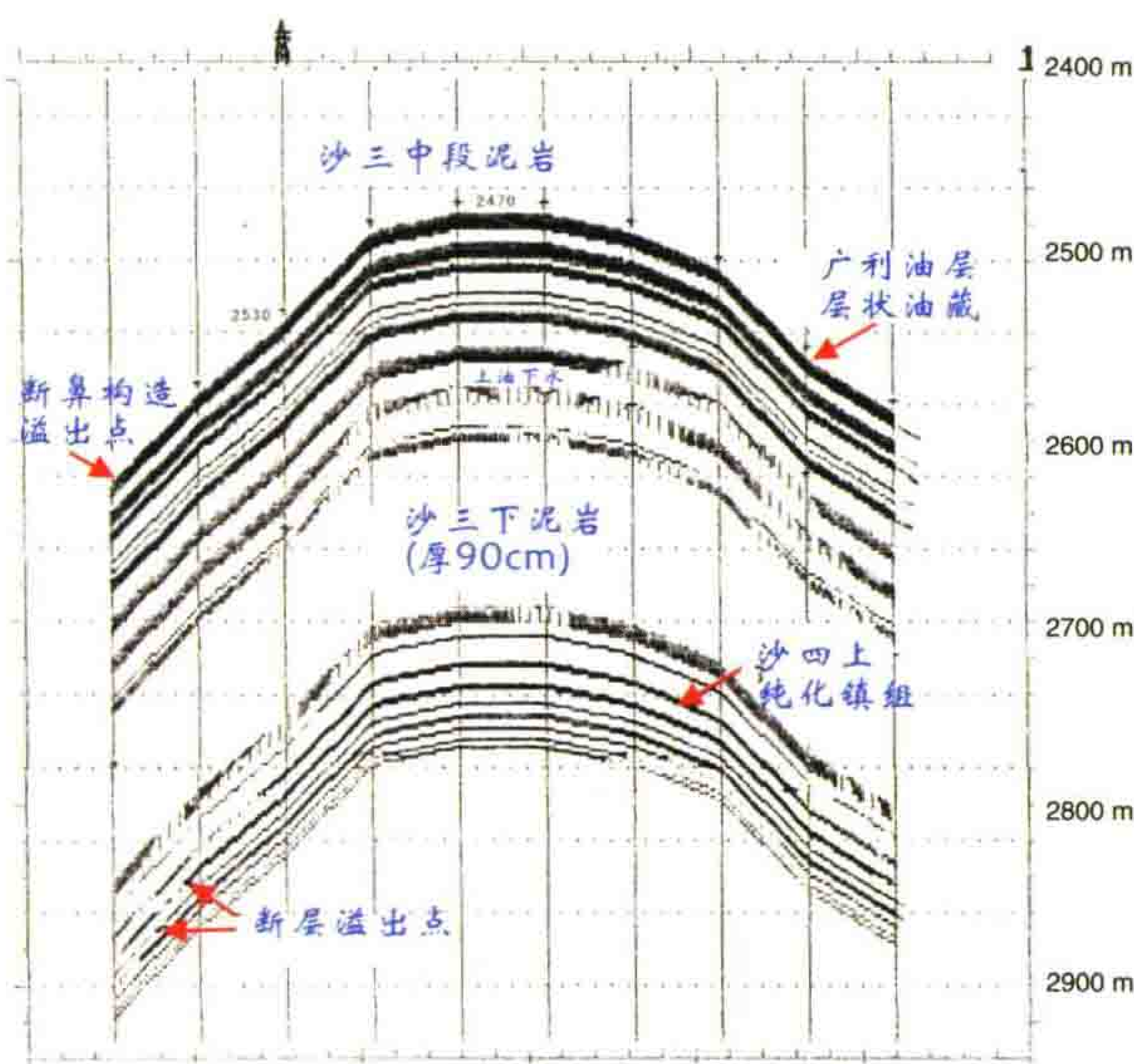


图 37　山东广利油田断层封堵分析图

在沙四上纯化镇组油层中，存在着断层溢出点，有 5 层砂的封堵范围较大，我们推测的封堵层数(8 层薄砂层)比实际含油层多了些(装油体积比实际含油体积大一些可能是合理的)。

(二) 东辛油田

我们以东辛油田的营 8 断块作了第二个试验。这个断块的平面构造图见图 38。该断块含油较丰富，储量约占东辛油田的 1/4。地层岩性柱子用的是图 6 中部的一口没有层位断缺的 18 井。图 6 就是用详探后的井下资料所作的南北向油藏横剖面。我们用一图一井方法，作出了东西向延伸的主断层(营北断层)的断层面封堵分析图，见图 39。此图在 2050～2150 井段中，沙二段的第⑥至第⑧砂组的主力油层为下盘沙一段泥岩段所封闭。再把断层溢出点所封堵的范围投到平面图上，就得到图 38 上的黄色区域的推测含油范围。它与沙二段的实际含油范围相差较大(差一倍多)。不过含油范围差一倍也不算失败，因为毕竟一图一井方法指出了这里可以装油，而且主力油层的层位预测得也基本是准确的(这里我们采用的构造图还是当年 51 型光点地震仪所得的老资料)。

在以上两个例子中，都采用自然电位曲线作为砂泥岩划分的依据，计算中采用 2 m 一个数据点。

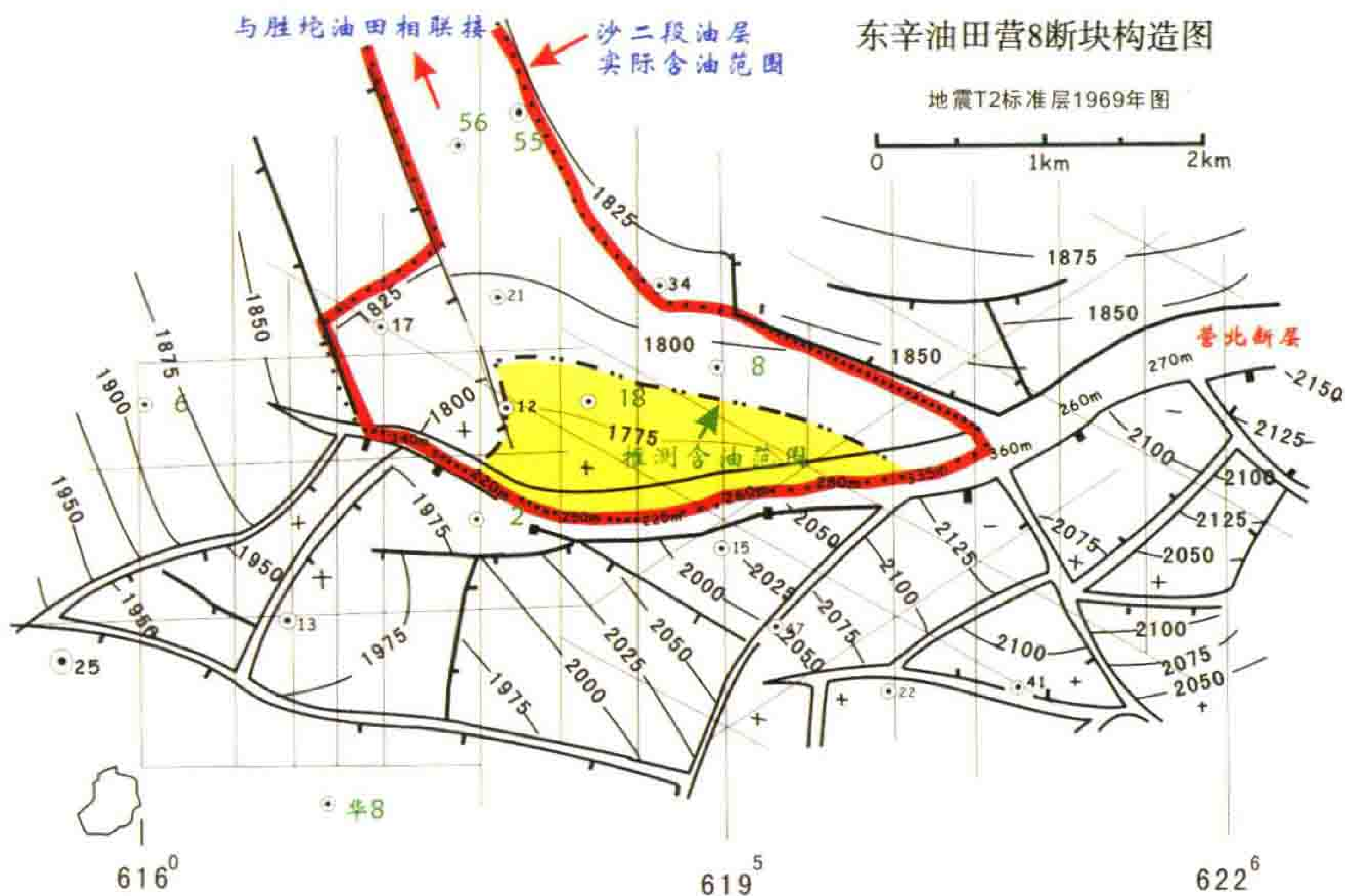


图 38　东辛油田营 8 断块构造图

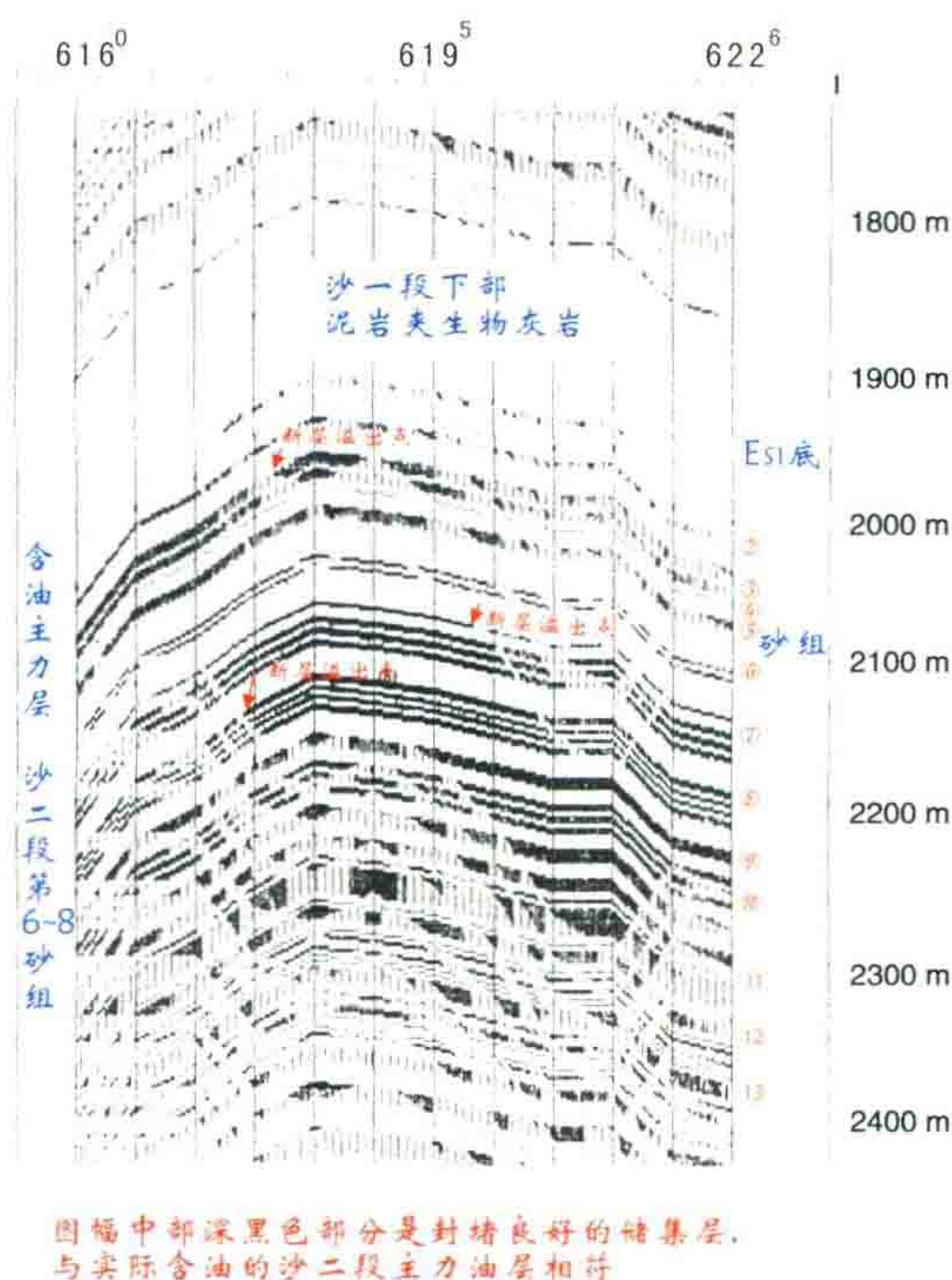


图 39 山东济阳坳陷东营构造营八断块断层面封堵情况分析图

（三）荆丘油田

荆丘油田是河北省第三系油藏中面积虽小，但储量较集中的一个油田，位于束鹿凹陷的南部。图 40 是该区的 T_4 构造图。图 41 是两口井的岩性柱子电测曲线。含油层位是沙二段砂岩，在其上面沙一段下部地层中有一段较厚的含石膏泥岩段，厚 90～130 m。它具有极高的视电阻率，但是自然电位曲线的特征和砂岩一样地朝负向偏移。同时，由于泥浆与地层水矿化度的变化，造成在 1500～2600 m 井段自然电位曲线平直，并且上、下自然电位曲线反向。这给本区利用自然电位曲线划分砂层带来一定的困难，必须综合考虑多种测井及录井资料，才能准确地确定其岩性。同时，本区不少井柱又通过断层，由地震剖面图 48 可见，45 井及 45-42 井在叠偏剖面上穿过断层，层位有断缺。在使用一图一井方法之前，要设法把断缺的层位补齐。

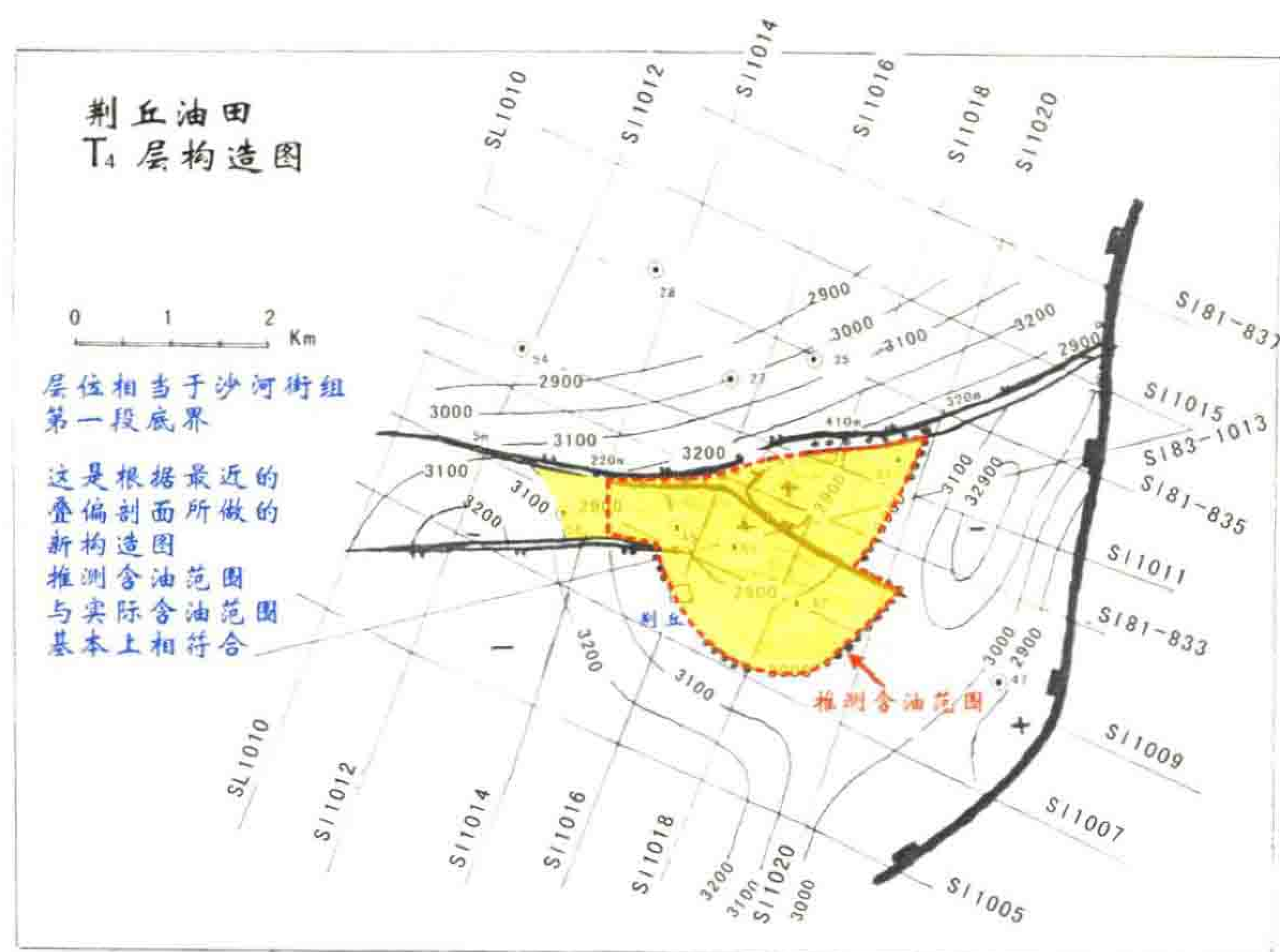


图 40 荆丘油田 T_4 层构造图

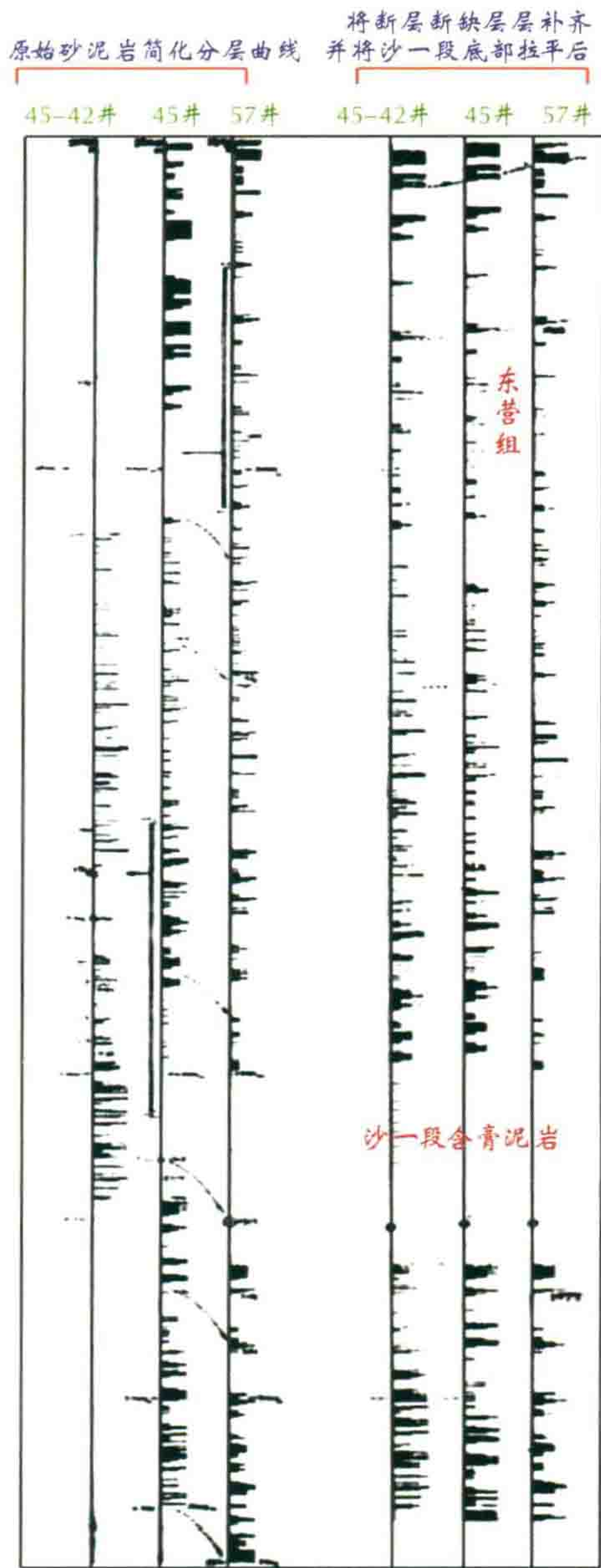


图 41 45-42 井、45 井及 57 井的砂泥岩简化分层原始曲线与经过断缺层位补齐又将沙一段底部拉平的结果

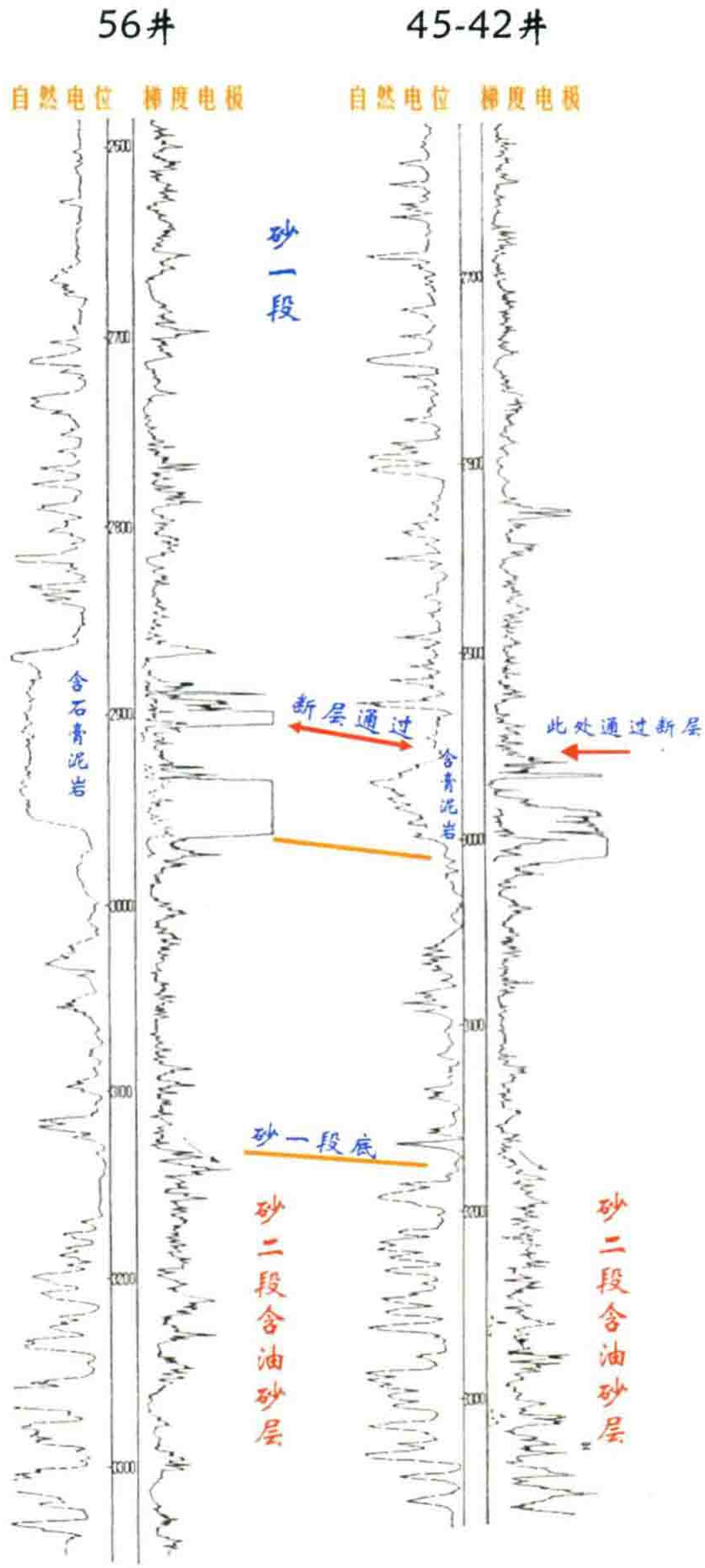


图 42 荆丘油田某两口井的岩性柱子

图 42 左方三条曲线就是 45—42 井，45 井及 57 井三口井的砂泥岩简化分层[只划分为砂、粉砂、泥质粉砂及泥岩(包括石膏)4 个等级]的原始曲线(2 m 一个采样点)。其中前两口井都断缺 300～350 m地层，只有 57 井是完整而没有层位断缺的。图 42 右方三条曲线是将断缺层位补齐后，又将沙一段底部拉平所得之结果。

首先，我们作出一条南北向的构造岩性剖面图，如图 43。其岩性柱子采用 57 井井柱，假定南北向没有岩性变化。使用地震构造图的 1018 测线上的海拔高程，得到如图 43 的剖面图(此图横向比例已经过压缩，倾角是夸大了的。而且断层画成垂直的空当，由于断缺层位已补齐，因此对判断砂泥岩接触关系没有影响)。图中可看到两处断层，北部主断层落差达 410 m，显然起着主导作用。其下降盘的沙一段含膏泥岩段封堵了南面沙二段油层，形成了荆丘油田。

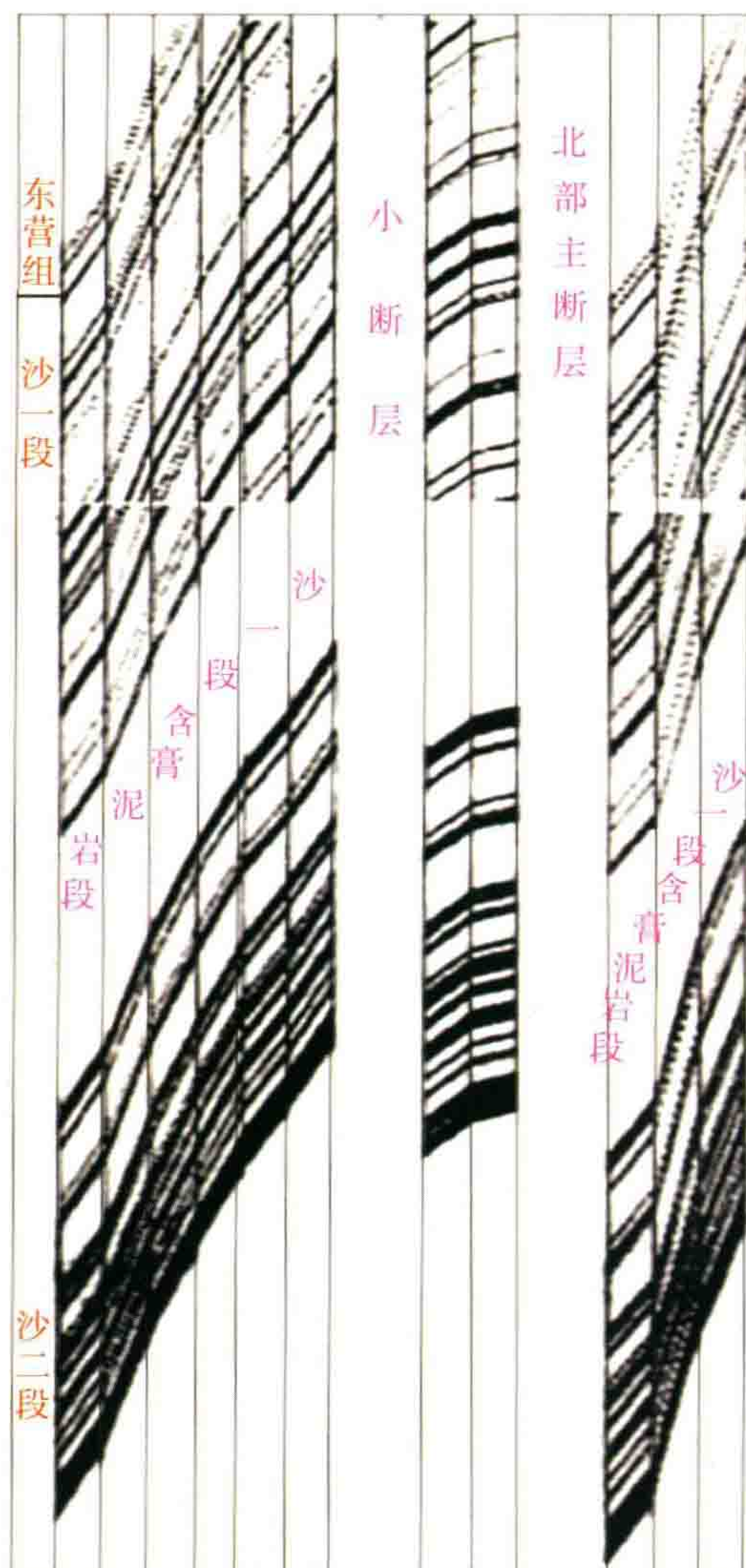


图 43 荆丘油田南北向岩性构造剖面图

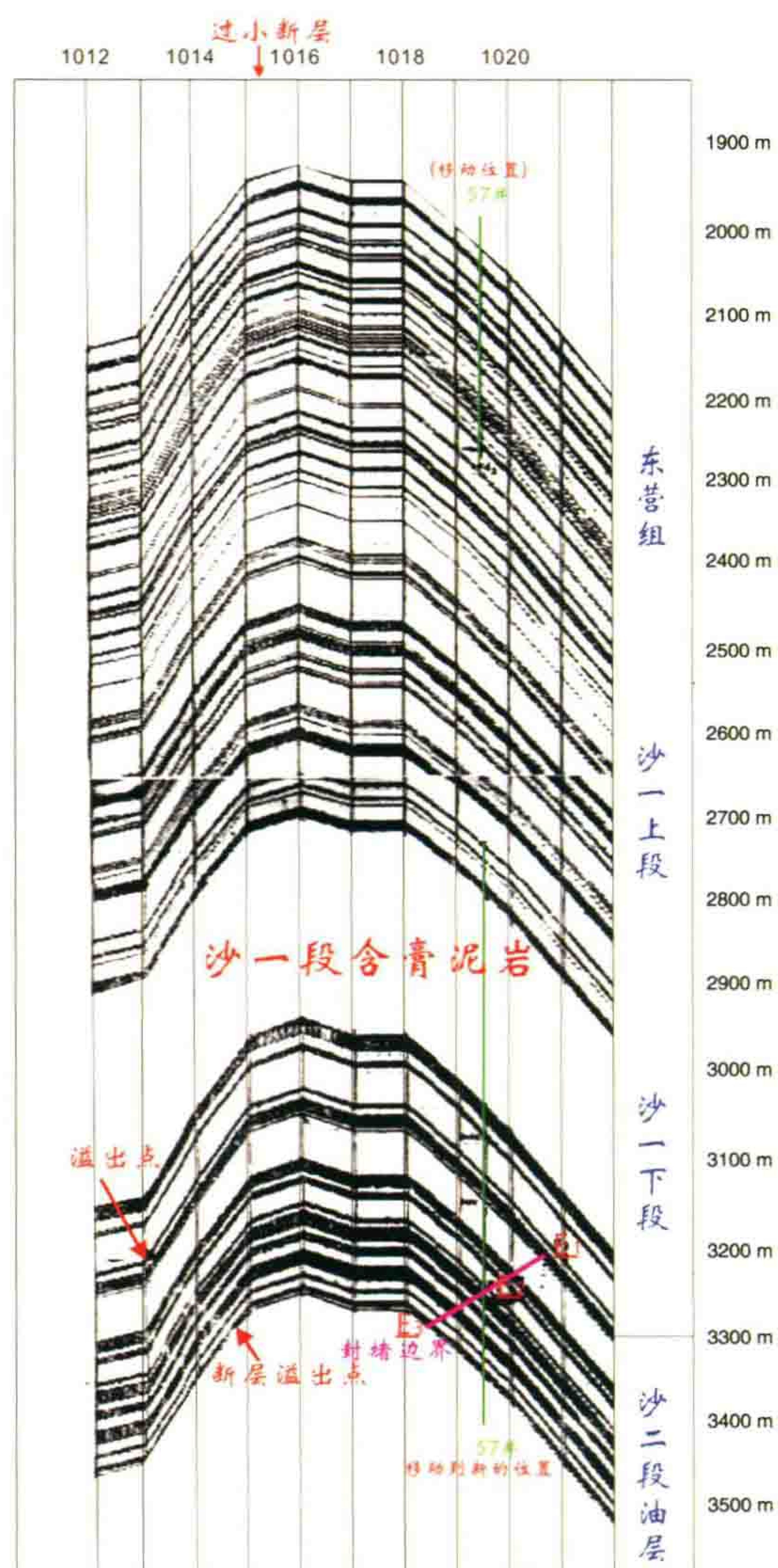


图 44 荆丘油田采用 57 井井柱得到的断层面封堵情况分析图

我们再用一图一井法来分析这条主断层的封堵情况。图 44 及图 45 为两次分别采用 57 井及 45 井(采用单井)并且假定没有岩性变化所得之分析结果(其中 45 井是用经过补足断缺层位的井柱子)。可见两次分析结果基本上是相同的,都能反映油藏的封堵特征。主要封堵层位是沙二段砂层(即图 3020～3280 m 一段)。断层溢出点在左边。根据相同海拔高度把每层的溢出点位置投向右边,找出各封堵边界点,如 E_1、E_2、E_3,用黑色涂满这些封堵面积(复印后变深黑色)。最后,将封堵边界的横坐标投到平面图上,就得到如图 40 中红色虚线标注的推测含油范围。这个推测结果与实际含油范围吻合较好,是西边 56 井实际上还是含油的(差 300 m)。*

* 我们按 57 井沙一段底部高阻层底的分层数据将 57 井投在图 44 剖面中,由于实际上此井不在断棱高点上,可以变通地将其移到相当于图中标出的位置。从此也可以看出它已经接近于沙二下油层的封堵边界的位置(E_3)。在 3240 m 以下是不能封堵的水层。

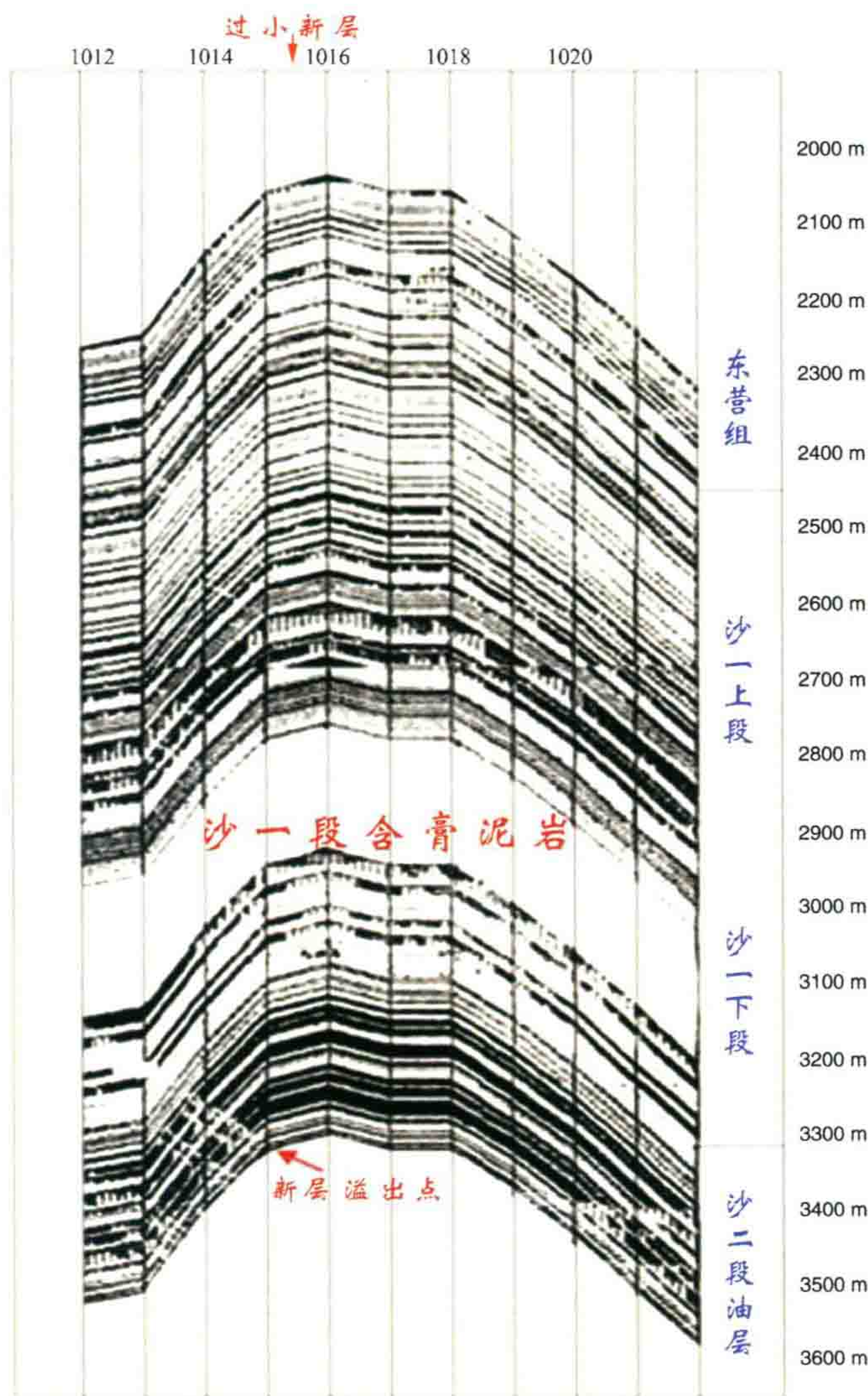


图 45 荆丘油田采用 45 井井柱得到的断层面封堵情况分析图

此外，荆丘油田的地层倾角在主断层以北为 12°。主断层南平均为 7°，断层面倾角约 50°。据此算出伸缩系数 $K=0.936$ 上移量也不大。因此，带与不带倾角校正所得的分析结果也基本上没有差别，并且在这里即使采用含油范围以外的井作分析，结果也大致相同。

九、岩性有变化情况下的圈闭分析方法(一图多井分析法)

当构造范围内有多口钻孔资料时，可以根据多口井的井柱子，做出砂层分布的空间内插，从而在内插砂层的基础上来分析构造或断块的圈闭封堵情况。这样分析的结果由于利用了较多的井，因而更加合理，同时也还可能指出大致在哪里可以找到岩性圈闭。

我们设计并编制了一种在两井之间作砂层内插的灵活的程序 SANDINTE，只要输入两口井的柱子，并告诉计算机各井的地层分层对比数据，计算机就可以按照小层对比的原则把砂层的分布内插出来，并且此程序可以自动处理具有不整合面及有断层情况下的砂层内插。关于这项砂层内插程序的详细内容请参看我写的一篇附录文章《符合小层对比原则的砂层内插技术》。

现在假定在荆丘油田上，我们手里有三口井(57、45 及 45-42)可以拿来作分析，它们分别代表南、西及中部的砂泥岩分布情况。我们用 45 井及 45-42 井两井作控制，内插出其中的砂泥岩分布情况，将其代表

北部主断层附近的东西向砂层分布情况，内插结果如图 46。此图中可以看到有的砂层尖灭，有的砂层分叉或合并，还有透镜状砂岩。图中砂层的厚度都在变化，它们是符合于小层对比原则的，是一种由计算机自动作控制的内插方案（改变内插参数可以改变一部分细节内容，但总的情况是不会变得太多）。

用这条东西向的岩性剖面当作北部主断层附近的岩性变化剖面（既代表上升盘又代表下降盘），就可以用我们的程序作出一条（上升盘 U 的）断层面封堵情况分析剖面图，即图 47。此图对沙二段油藏的封堵范围的结论与图 44 及 45 是基本一致的，但更详细清楚了。图中更指出了一些岩性封堵的信息，可供追索（荆丘油田的含油情况与岩性有密切关系）。

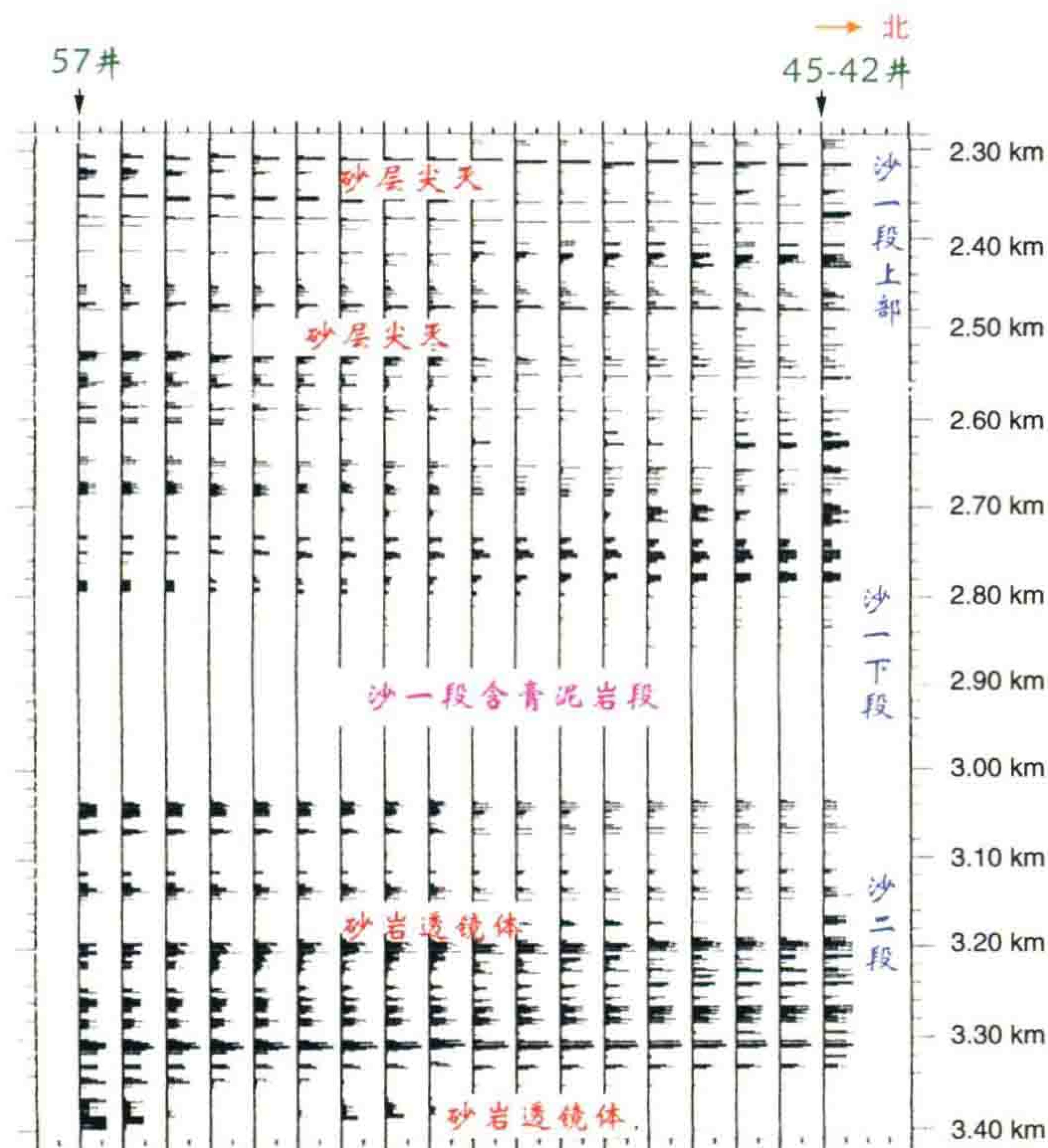
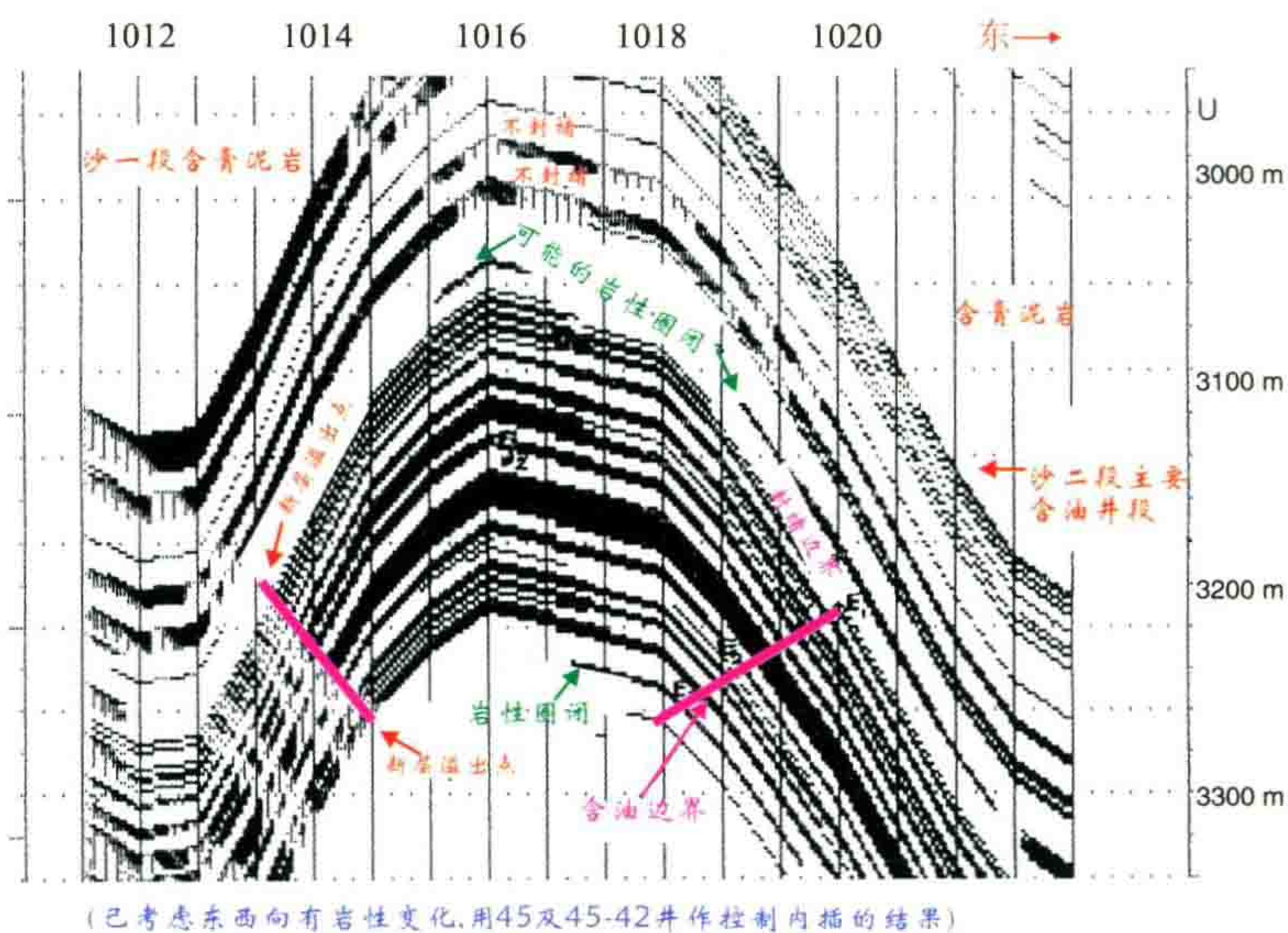


图 46 荆丘油田南北向岩性变化剖面

（57 井及 45-42 井之间作地层对比砂层内插的结果）



（已考虑东西向有岩性变化，用45及45-42井作控制内插的结果）

图 47 荆丘油田东西向主断层断面封堵分析图

再用 57 井及 45-42 井内插出一个南北向的岩性剖面。

用这个岩性剖面，加上地震构造图 48 上 1018 测线的海拔高程信息，就可以绘出一条带有岩性变化的南北向构造岩性剖面图，即图 49。此图比图 43 更详细清楚了。砂层的分布情况比只依靠一口井当然更合理了，也可以用它来研究岩性圈闭的情况(图 49 的主断层以北，只能假定它没有岩性变化，因为 45-42 井刚好就打在主断层上，北面没有井控制)。

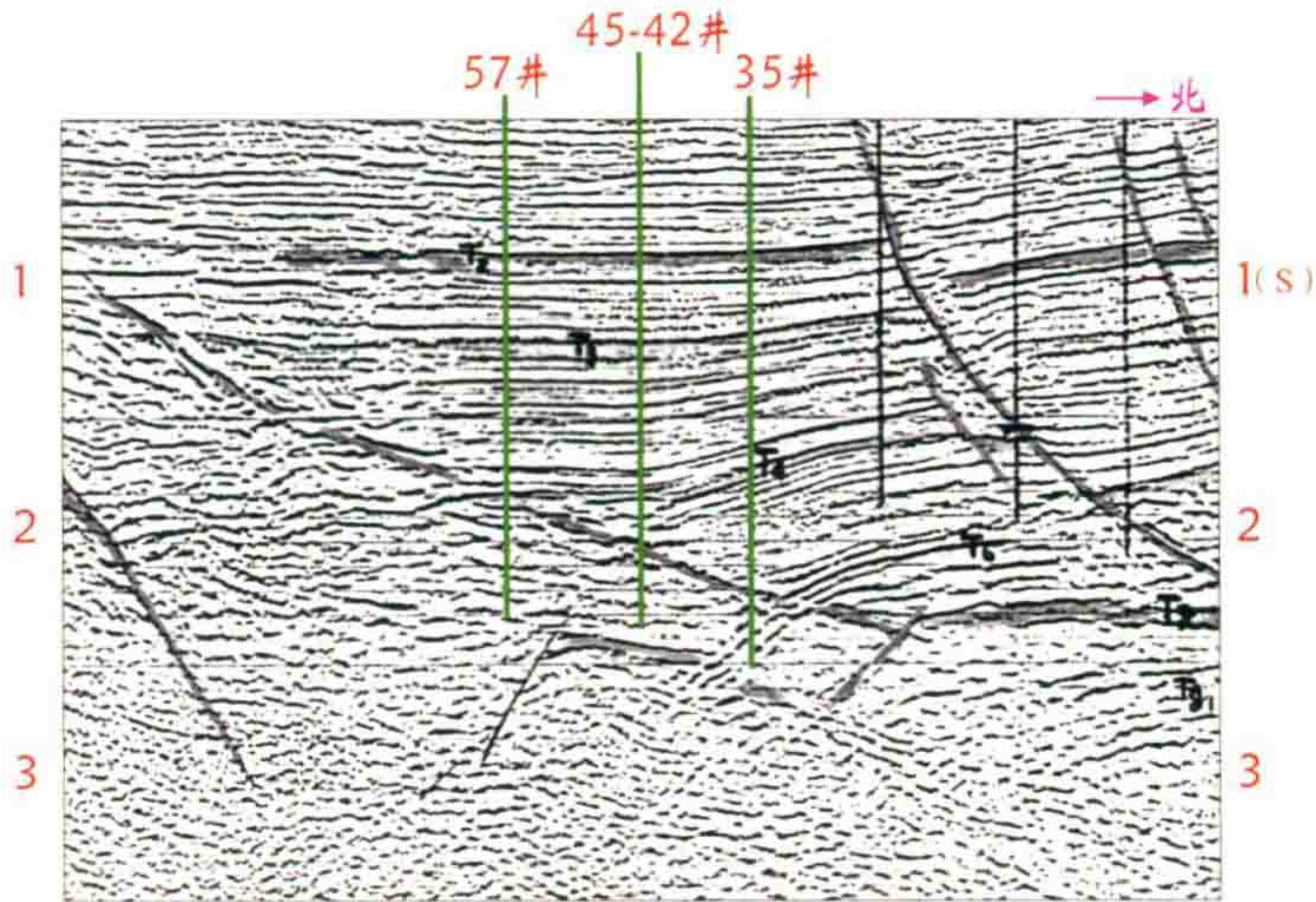
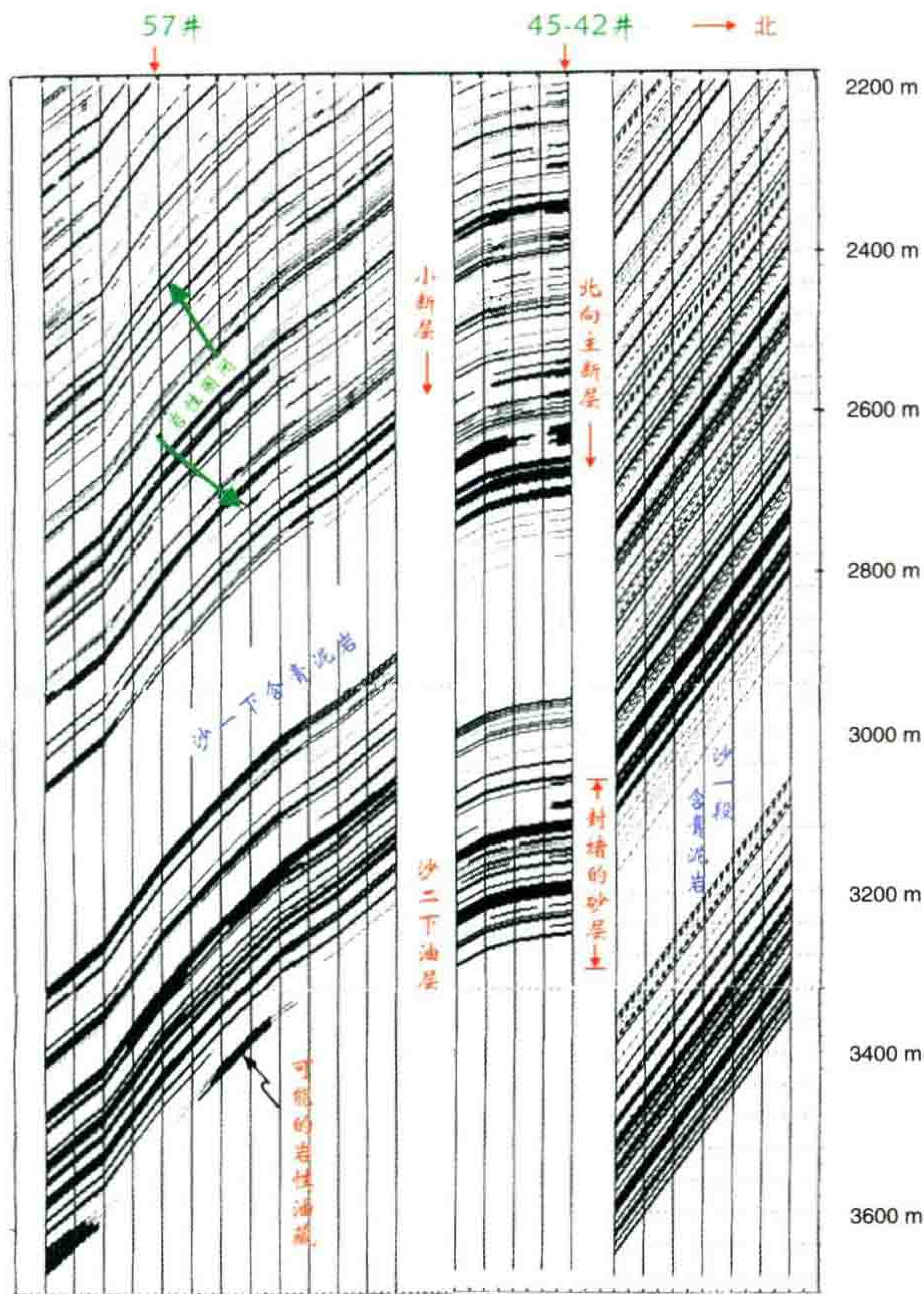


图 48 束鹿凹陷 SL83-1018 测线叠偏剖面(南北向过荆丘油田)



(本图纵比例是经过夸大的，而且断层断缺层位已补齐，可用来分析断层两侧的岩性接触关系及圈闭封堵情况。)

图 49 荆丘油田南北向带有岩性变化的构造岩性剖面图

十、圈闭分析的实施步骤及注意点

总结以上各节内容，圈闭分析的实施步骤及注意点如下。

(1) 地震构造图的准备：此图应尽量精确。最好附有沿测线读数及断层上下棱的高程读数，并标出落差。有时应加密等高线距以及检查断层平面连接方案是否正确。一个构造上有多个标准层构造图时，应选有利的接近目的层的构造图优先作分析。

(2) 钻井井柱的准备：根据多种测井，录井资料确定岩性(主要使用自然电位、井径及自然伽玛曲线)。我国过去常规的声波测井由于没有井眼补偿功能并且源距太短，重复性也很差，使用中注意不要上当。简化的输入方式是1 m读一个点，砂岩读作2，粉砂岩读作1，泥质岩及非渗透层读作0，逐点输入微机。有条件的单位则可以将电测综合解释的孔隙度曲线、含砂量曲线(或含泥量曲线)直接用数字化桌输入微机，建立文件。井柱的长短应选取作图标准层所相应的地质层位，并向上(对分析上升盘来说)或向下(对下降盘)延长比一个落差稍多一些的距离。

(3) 核对这些井在地震叠偏剖面上是否穿过断层。如果穿过一正断层，则需要参考邻井将断缺层位补齐。如果只有一口井且又有断缺层位时，则只能根据一般地震地层学解释的岩相带条件，人为地补入一段地层。

(4) 根据构造图的情况，选取1至2条主要剖面，争取垂直构造走向并通过构造最高点及最低位置。用我们的FAULTSEC程序作出一两条构造岩性剖面，并分析起主要封堵作用的断层是哪几条。然后沿着这几条断层再用FAULTSEC程序作出上下盘构造岩性剖面。再用SEALSECT程序作出断层面封堵情况分析图。

(5) 下一步是解释断层面封堵分析图，定出各砂层的溢出点位置及封堵边界，并将封堵面积涂以红色。简单的情况下根据解释结果，就可以将封堵边界点的横坐标投到平面图上，并标出其封堵范围(即最大含油面积)。复杂断块的情况下，要等待每个断块都分别作完分析后，最后圈定总体封堵范围。

(6) 在测区范围内有多口钻井资料时，可以使用我们的砂层内插程序SANDINTE，来完成模拟砂层的变化。然后用FAULTSEC程序作构造岩性剖面图，并用SEALFAUT程序作断层面封堵分析图。以上所提到的5个程序，都是用Quick Basic 4.0在微机上运行的，能自动作彩色屏幕显示，并可在宽行打印机上作黑白屏幕拷贝图件，

从以上3个油田的实际例子，可以看到本方法已经具有实际使用的价值，可以用来预测在哪里、哪个层位可能存在着油气藏，并且它对圈闭的评价更接近客观实际。

但目前该方法还存在着一些局限性：例如，它对简单的断鼻构造比较容易分析，但遇到许多断层的复杂断块时，就很难用一系列二维的图件来分析三维空间中的砂层连通及总体封堵情况。当然，这并不是不能做或做不到，而是人工分析的工作量太大、太复杂。因此，我建议解释中心或研究院来发展此项技术，用三维等深度切片的方式研究砂层连通的方法，并把它推广到三维人机联作的计算机系统(或解释工作站)中去。

十一、结论及建议

(1) 本文所阐述的圈闭分析技术是从我国东部断块油田勘探经验中总结出来的。它是胜利油田一些地质学家“砂层不见面，盖层不破坏”思想的进一步发展。一图一井分析法及一图多井分析法为全面地研究圈闭提供了一个正确的思路。虽然该方法目前还不很完善，但已经可以在微机上显示并作出分析图件，并在3个已知油田上预测其含油范围，结果与实际含油范围符合较好。因此建议推广应用，并在推广应用中完善此项技术。

（2）此项技术目前对付非常复杂的断块油田尚有不足之处，看来今后必须使用较大的计算机或解释工作站，来完成复杂的砂层内插及砂层连通性分析及封堵分析。本文最后提出的用三维等深度切片的方式研究砂层连通的方法，今后值得一试。此项工作就当前来说，是为解决勘探上的问题；就长远来说，也是今后油田开发及油藏工程研究中所迫切需要的。

（3）找油理论中最重要的一个内容是寻找圈闭，而对于圈闭的概念需要将构造及岩性两个方面的信息综合起来，才能获得正确的认识。过去这两方面分别由两种专业人员分别作研究，结合得不够紧密，这是一个很大的缺陷。本文给出了几个生动的油田实例，它说明了一个事实：如果我们把地震勘探研究和测井、录井资料结合在一起，寻找圈闭的任务会解决得好得多，从而可以尽量避免目前一个断块高点打一口井的机械做法所带来的经济及时间上的损失，油田发现的速度就可以加快。

（4）本文讨论的圈闭分析方法只适合于砂泥碎屑岩地层中的圈闭，目前尚不适合于对碳酸盐岩裂缝性地层的圈闭的分析。

参考文献

[1] 胜利油田地质指挥所. 济阳坳陷复杂断块油田的勘探经验[R]. 东营：胜利油田内部文件.

[2] 胜利油田勘探开发科学研究院. 覆盖区断裂力学性质鉴别与封闭性初步探讨[R]. 东营：胜利油田，1972.

[3] 李庆忠. 符合小层对比原则的砂层内插技术[J]. 石油物探，1989，28(1)：12-21.

附件：本文图 28 的交代过于简单，现在补充绘一张说明图如下。

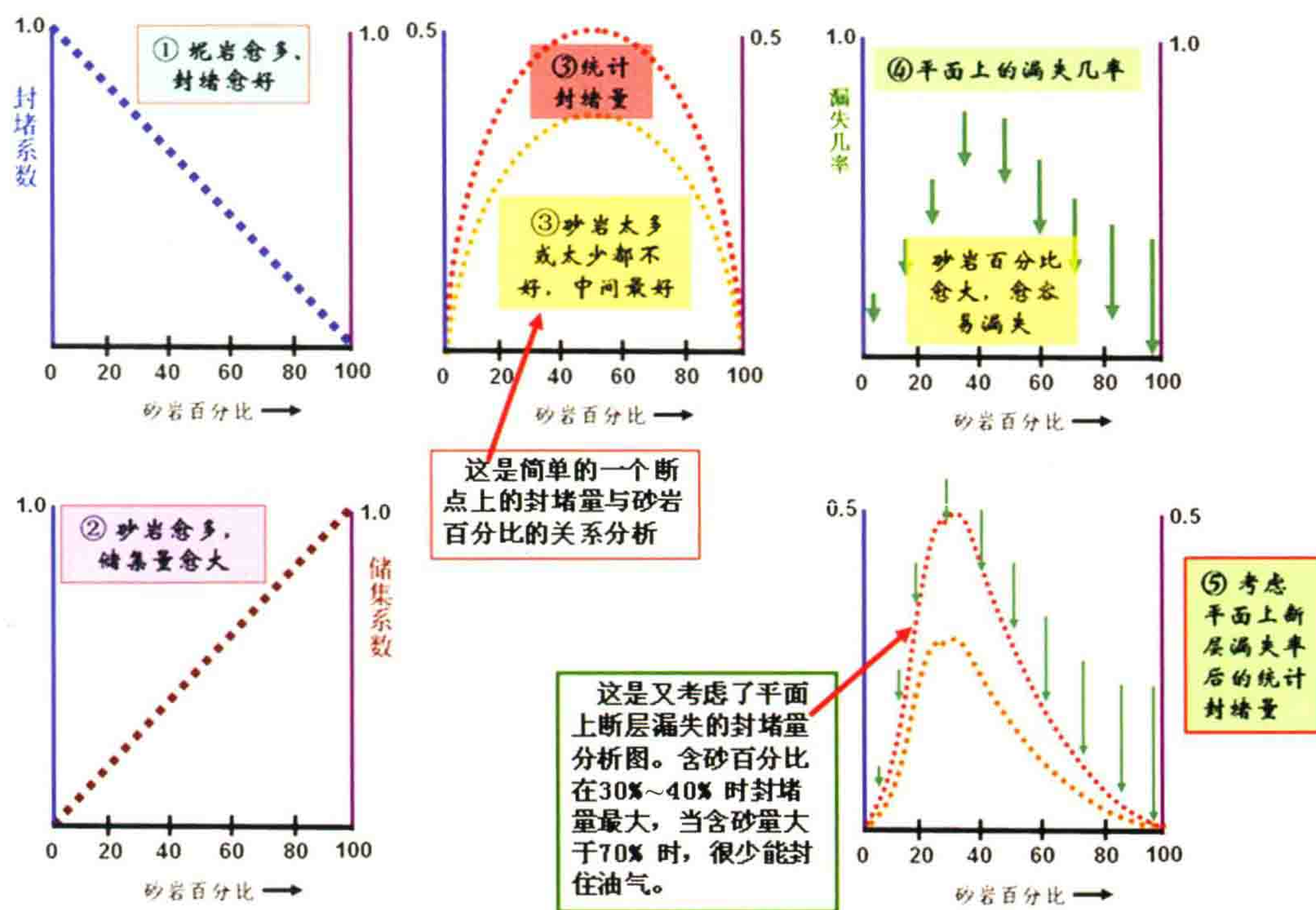


图 50

此图读者一看便明白，寻找油气不能只找构造在那里，研究储集层的时候也不是砂岩愈厚愈好，油气圈闭是由构造与岩性二者的结合所决定的。而且显然砂岩百分含量是与沉积相带有密切联系的。今后对一个含油气盆地应该首先根据目的层系的岩相变化，优先勘探其三角洲相带，那里的砂岩百分比接近

30%～40%。在这个相带里有希望找到丰富的油气储量。在含砂量5%～10%的滨湖及三角洲前缘相带里，一般是容易找到油气的，但是储量不大。而含砂量大于70%的粗相带部位，对断块油田是很难保存油气的。

图50讨论的内容主要是针对断块油田的。我们东部大多数属于拉张型盆地，这里的油气田几乎在每个构造上都有断层的分布。即使构造最简单的大庆油田，通过地震勘探也发现“长垣”上存在一系列小断层。而10 m左右的小的断层对于3～5 m组合的储集层来说，已经是有着对油气圈闭具有重要作用的因素了。所以，从沙尔图到杏树岗一带属于三角洲相带，保存着丰富的油气储量；从葡萄花直至敖包塔就是滨湖相薄砂层发育的地方，主要是岩性油田分布的地方。而大庆油田在滨州铁路线以北，地下的嫩江组有很多隆起构造，钻探后都出水，这主要是赖北面的岩性太粗，加上水动力条件不好所形成。另外一个例子是我国珠江口坳陷及东海各盆地里，近岸沉积里的相带太粗，这与我国东南沿海的隆起区在新生代时期的长期快速侵蚀，提供了丰富的碎屑物源有关。因此海上油气田都退到离岸50～80 km的西江—惠州—陆丰等油田及平湖气田那里去。

文章编号 304-2



符合小层对比原则的砂层内插技术



这是前一篇文章的一个附录。

我的 304-1 文章《圈闭分析技术》向几个杂志投稿后，杂志编辑都嫌我的文章太长，要我改写缩短，我不愿意，就只好搁下。作为讲稿，我在物探局作了几次报告，反应很好。1999 年，我们的职工大学帮我付印成内部教材一册。

而《石油物探》杂志社没有发表我的正文，却选择了我这篇附件加以发表了。不过这个附件倒也起到一定的作用，因为我无偿地提供了这种内插技术的 Basic 软件。研究生用它来内插几口井之间的测井曲线很方便，也很漂亮。

此文 1989 年 3 月发表于《石油物探》第 1 期，作者李庆忠。

摘　要

在研究地下岩性变化及绘制构造岩性剖面时，需要在已知井的岩性柱子之间内插砂层。这个问题不解决，就很难使用计算机来帮助我们研究砂层变化和寻找各种圈闭。本文所介绍的砂层内插技术是一种符合小层对比原则的砂层内插方法。用该方法内插出来的砂层既有厚度变化，同时又具有岩性（振幅）变化。此外，还允许在剖面中存在不整合及断层的情况下作出相应的妥善处理，使输出结果符合一般地质规律。文中给出的砂层内插程序可以在 IBM—XT 以及其他兼容性微机上远行，效率是很高的。

一、砂层内插方法的思路

在已知井之间作砂层内插，大致可以采取以下几种方法。

（一）简单的数据内插法

这是根据两口控制井的数据，逐点按两边离井距离成反比地作加权内插

$$A_{iot}=A_{L}\cdot(1-dx)^{K_L}+A_R\cdot(dx)^{K_R}$$

式中：A_L 及 A_R 是左右两井的采样数值；变量 $dx=x/D$，D 为两井间距离，x 是内插道离左方井的距离，dx 可理解为内插距离的百分比例放，它从左到右由零变到 1；K_L 及 K_R 是由用户提供的内插中对左、右数据振幅控制衰减快慢的指数参数。当 K_L 及 K_R 都为 1 时，就是最简单的线性内插；当参数 K 不等于 1 时，称为指数型数据内插。例如，在 K 大于 1 时，振幅横向指数衰减就快；反之，K 小于 1 时衰减就慢。

这种内插是对逐个样点用相同的公式往下做的，因此其结果是所有的砂层只有振幅（岩性）的变化，而不会有横向厚度的变化[图 1(a)]。对砂层变化来说，此法不符合于客观地质规律。

（二）高级的砂层内插方法

以地震反射信息为基础，用钻井资料作控制来做砂层内插，这是较为理想的方案。但迄今为止，内插工作要详细到几米的薄砂层还是不现实的。目前比较精确的方法是西方地球物理公司的 SLIM（地震岩性模拟）方法。该方法根据钻井资料所提供的地层初始模型，用迭代修改模型的方法作正演模拟，逐次与反射地震记录进行比较，达到误差最小的最终地质模型则作为输出。这种办法可以获得 8～10 m 左右砂岩横向变化的内插结果。但是，它在大型计算机上工作需要花费很多的机时，若工区内每条测线都要做，其代价实在太大。

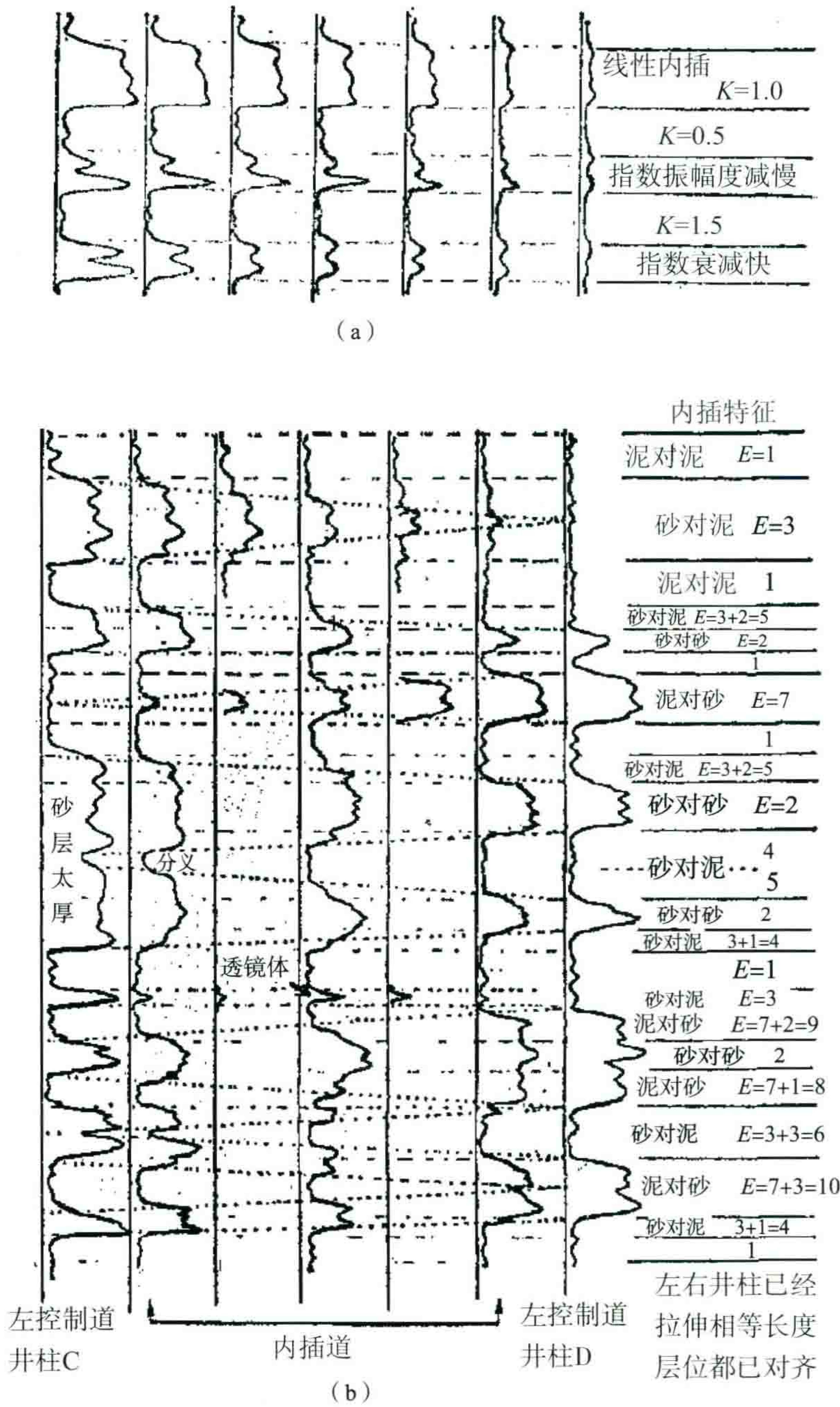


图 1 a. 简单的砂层内插方法；b. 符合小层对比原理的砂层内插方法

另一种方法是作地震波阻抗反演。它在信噪比较高的地震资料上可以分辨 20～30 m 厚的砂层，取得其岩性变化的信息。这是目前作砂层横向预测中比较实用的方法。但此方法在处理中要求精细的分析及人工干预，稍不谨慎就得不到预期的地质效果。此外，目前它分辨砂层的能力尚较差，也还不能来用作砂

层内插。

（三）符合小层对比原理的内插方法

研究油田地质的地质家们在地层对比的基础上，划分出砂层组，就可以用手工画出一条条剖面的砂层变化图件。这种图体本身就是一种砂层内插，它虽然有主观的成分，但却是一种简单易行的方法。我们的程序就是借鉴这种方法，采用人与机器结合的方式来做内插的[图 1(b)]。

我们先来归纳一下油田地质家作小层对比时所遵循的原则和步骤。

(1) 详细地寻找井下地层的对比标志层。主要通过化石、矿物鉴定和岩性、电性分析，找现井下地层的区域对比标准层和局部对比标志层，从而划分好大套的地层单元。

(2) 在上述基础上进一步对目的层系作砂层组的划分。这时主要考虑砂泥岩互层中的粗细旋回性及韵律情况，并且在厚度有规律变化(渐变)的原则指导下，进一步划分砂层组。

(3) 与此同时，通过地层对比，搞清不整合情况及断层的情况，指出地层缺失段(或重复段)的层位及厚度。

(以上三条是由地质家自己完成的，我们把由此得到的层位对比数据作为所述程序的输入数据输入计算机。)

此后进一步作小砂层对比，并画出小砂层的变化图(我们的程序主要完成这一部分工作)。

(4) 地质家在作小砂层对比时，井间砂层是否连续分布是根据左右两井在同一位置是否都有砂子来作判断的，所谓同一位置系指它们处于砂层组中相对位置相同而言(考虑一般情况，我们程序中将左右两个对比层段先拉伸成一样长的柱子，然后再作砂层对比)。

(5) 处理砂层的厚度变化时，认为砂子的厚度是容易上下变化的，而泥岩相对保持稳定。并且在内插砂层时，应该既考虑岩性变化又有厚度变化(我们的程序中可以既改变砂层厚度又改变内插振幅，以模拟岩性变化)。

(6) 具体作砂层内插时，采取下列 5 条连层原则。

① 如果相同层位上左、右两边都是砂子，则将该砂层连起来。

② 如果只有一边有砂子，那么就认为该砂层在内插区中间某处尖灭，尖灭点远近由地质家凭经验判断(在程序中输入不同的指数参数 P 作控制)；当内插区很大，在尖灭途中可能存在一些砂岩透镜体，这些透镜体是由地质家根据想象而绘在剖面上的(我们的程序中，可以由机器产生一个随机的视周期，绘出砂岩透镜体)；

③ 如果砂岩一边薄，一边厚，那么假定它们的厚度在内插区中是渐变的。

④ 如果一边的砂层较薄，另一边特别厚，则设想厚的砂层将要向薄的方向有砂层分叉的现象(我们程序中对厚砂层的内插分叉也作了规定)。

⑤ 如果地层中存在有不整合面，那么不整合面上下砂层内插方向是应该有所不同的，允许有超复及削蚀现象；在存在断层的情况下，砂层也应该内插延伸到断层面上为止(我们的程序能够完成此项任务)。

综上所述，我们设计砂层内插程序的思路是，遵循小层对比原则，由地质家告知地层对比的分层数据信息，并指定某些厚度及振幅变化的控制参数，由计算机再作出一些随机的局部参数调整，达到内插砂层比较符合地质规律的目的。

二、砂层内插程序的实现方法

现在编制完成的砂层内插程序采用 BASIC 语言在 IBM-XT 微机上运行。这是一个用英语做人机对话形式的操作方便的程序。

此程序需输入两口(或两口以上)控制井的岩性柱子(可以是声测曲线或其他能反应岩性的测井曲

线)。由用户告诉控制内插的分层数据和一些参数值(图 2)后,计算机就按照用户的意图作砂层内插。具体工序流程请参见图 3 及图 4。这里的关键是:

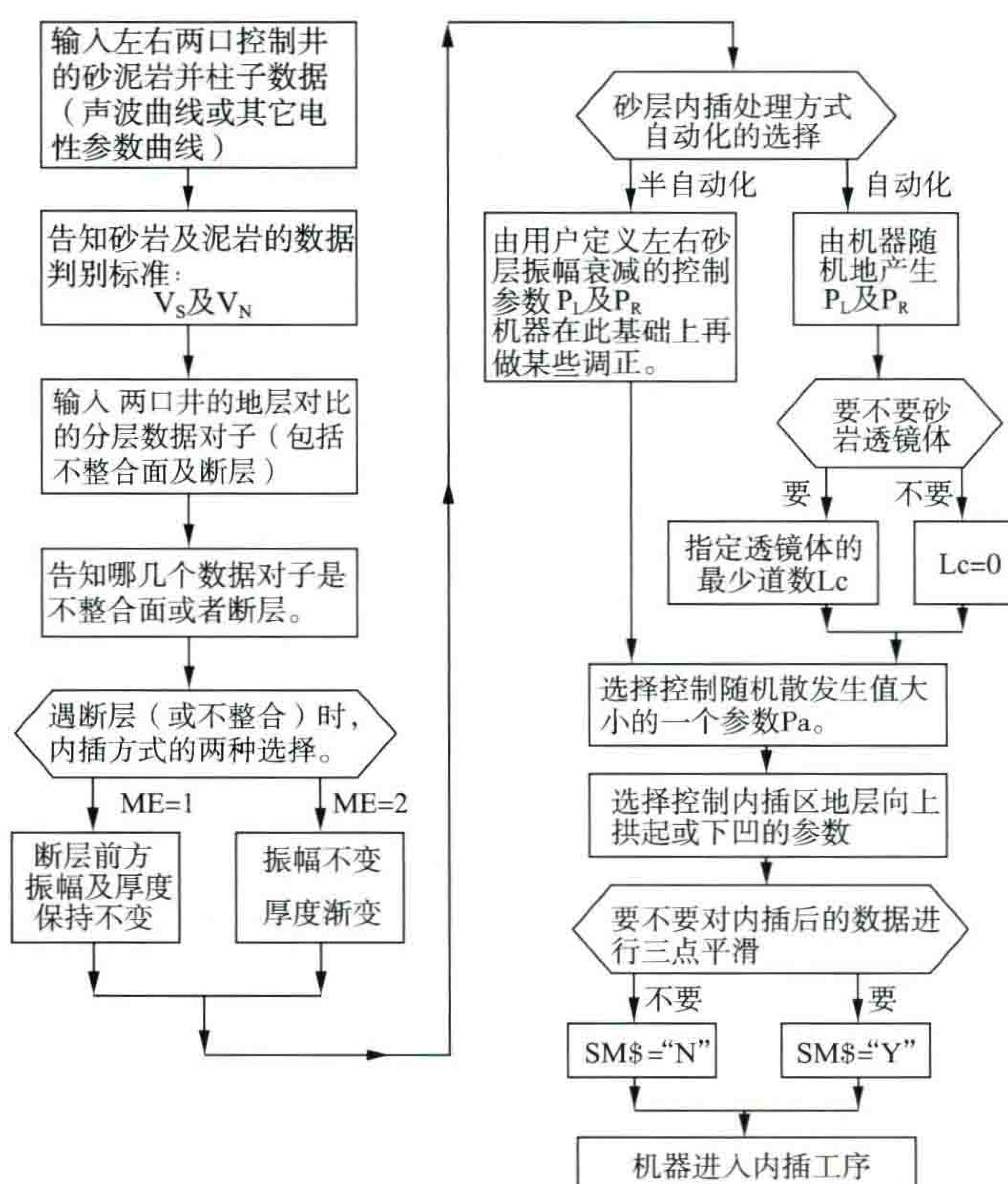


图 2　数据输入及参数选择框图

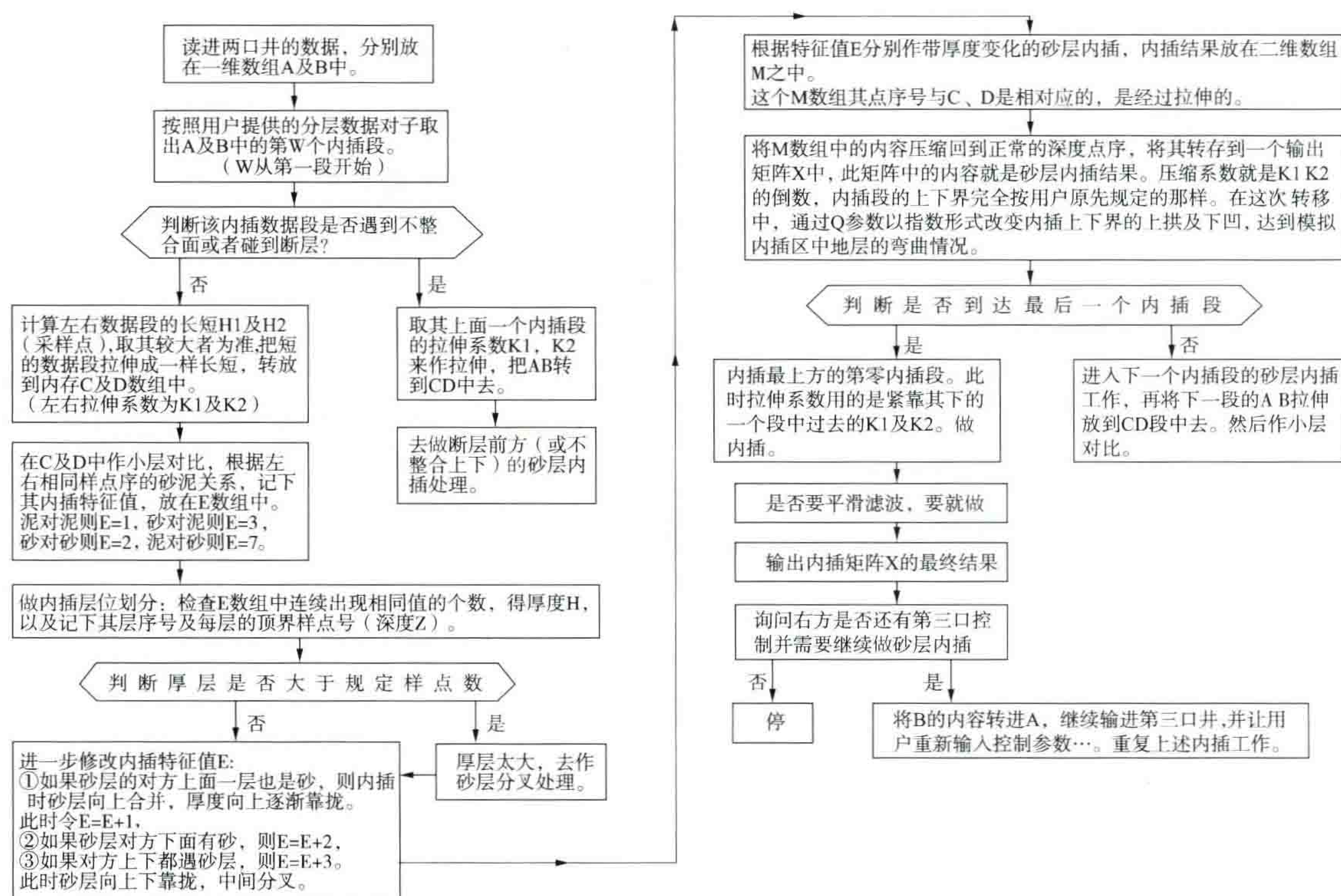


图 3　砂层内插工序框图

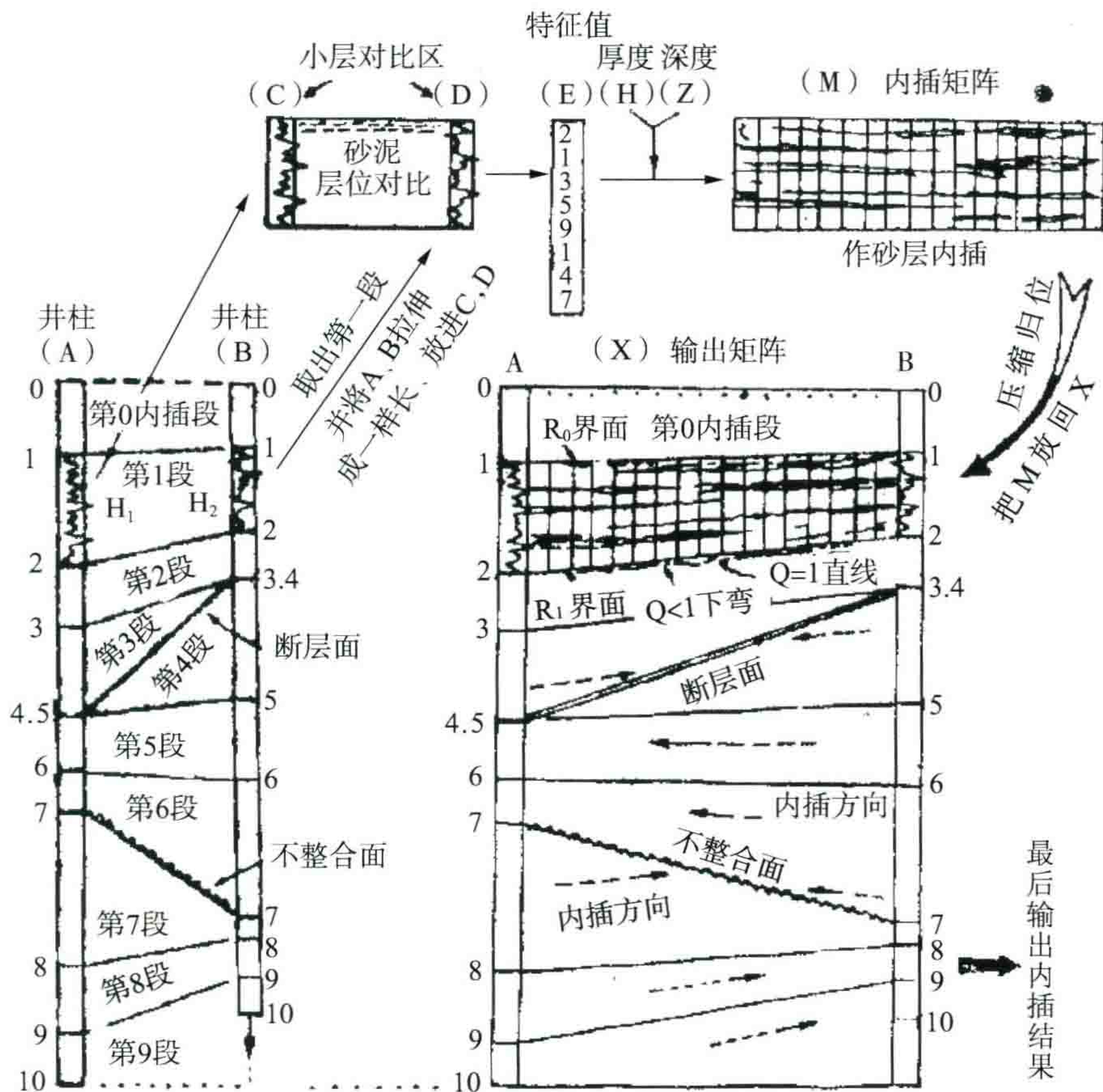


图 4 数据流的形式

(1) 内插中首先对左右井柱 A 及 B 中的数据，通过数据拉伸的办法，把一个内插段中的左右数据拉得一样长，并把结果放到一个小层对比区中去(即形成 C 与 D 两个数组)。这样就保证了砂泥小层层位的左右可对比性。

(2) 根据 C 及 D 中的砂泥对应关系鉴别内插特征值参见图 5，再根据特征值去作不同方式的砂层内插计算。

(3) 使砂层产生厚度变化的办法是在一个砂层的厚度范围内，采用阶梯状的加权系数，如图 6(b)所示。

(4) 对尖灭的砂层可以使用内插砂岩透镜体的选件。此时孤立的砂层由机器产生一个随机振动周期，控制加权系数，如图 6(c)所示。透镜体的最少道数(周期)由用户自定。

(5) 砂层内插工作在层位对齐的 M 矩阵中形成(图 4)。此后，程序将其压缩并归位，重新放回到一个输出矩阵 X 之中。在压缩回 X 时，内插段的纵坐标上界(R_0)及下界(R_1)是可以通过指数参数 Q 来做调整的。$Q=1$ 时是直线型内插；$Q<1$ 时，地层中央部分向下弯曲；而 $Q>1$ 时向上拱起。这样可以内插出弯曲的地层面来。

(6) 内插工作从第 1 段开始(如图 4 的例子)，接着做第 2 段，在做第 3 段时沿用第 2 段的拉伸系数(K_1 及 K_2)；然后回过头来做第 0 段，第 0 段用的是第 1 段的拉伸系数；接着再做第 5 内插段，并用第 5 段的拉伸系数去做第 6 及第 4 段；此后不整合面之下也是依 8、9、7 的次序作内插。第 9 段一直内插到输入数据的井底(两井可以不一样长，井底最长的一个读数就决定了内插结果的输出总点数)。

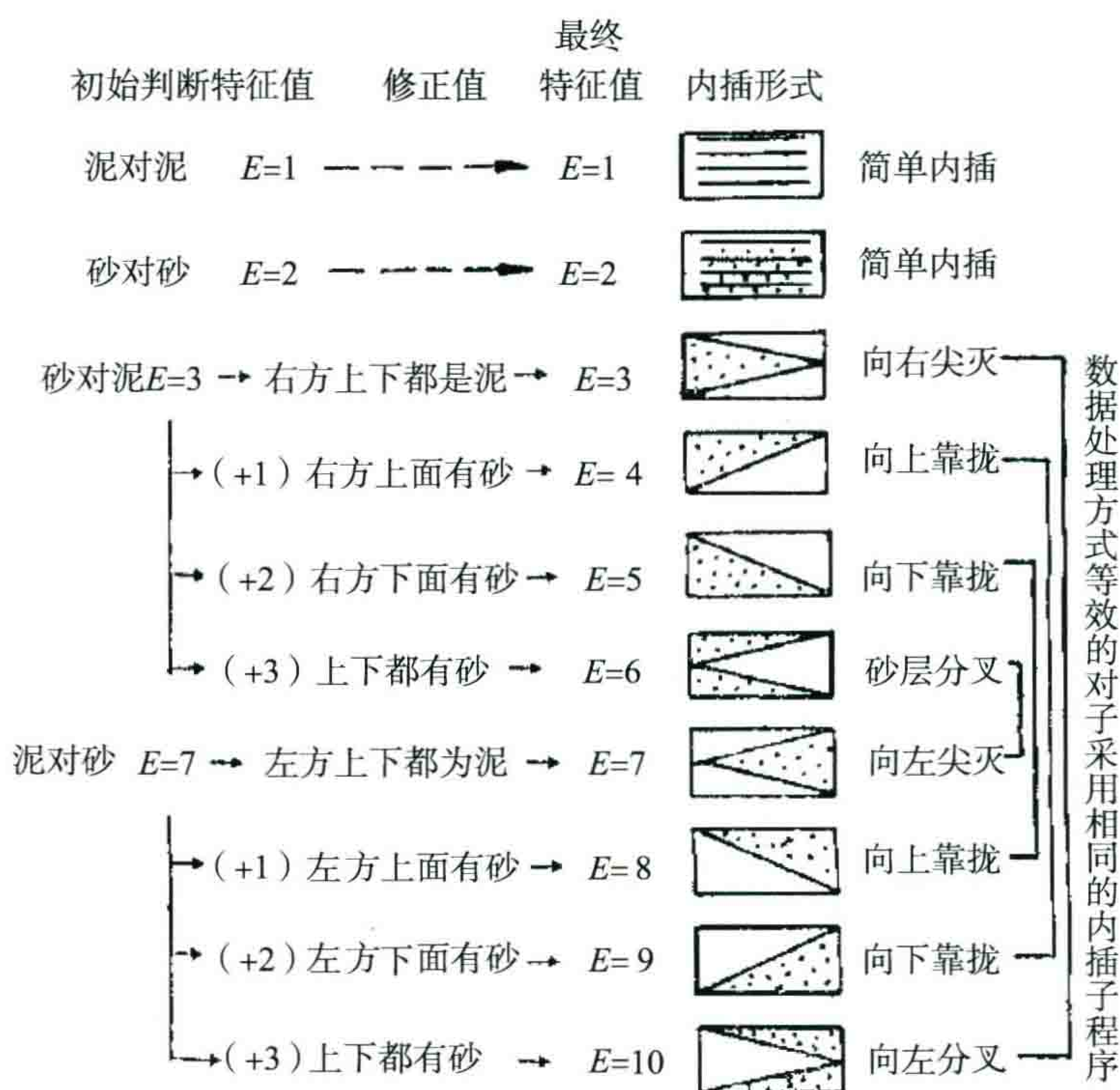


图 5　小层层位的左右方砂泥对比

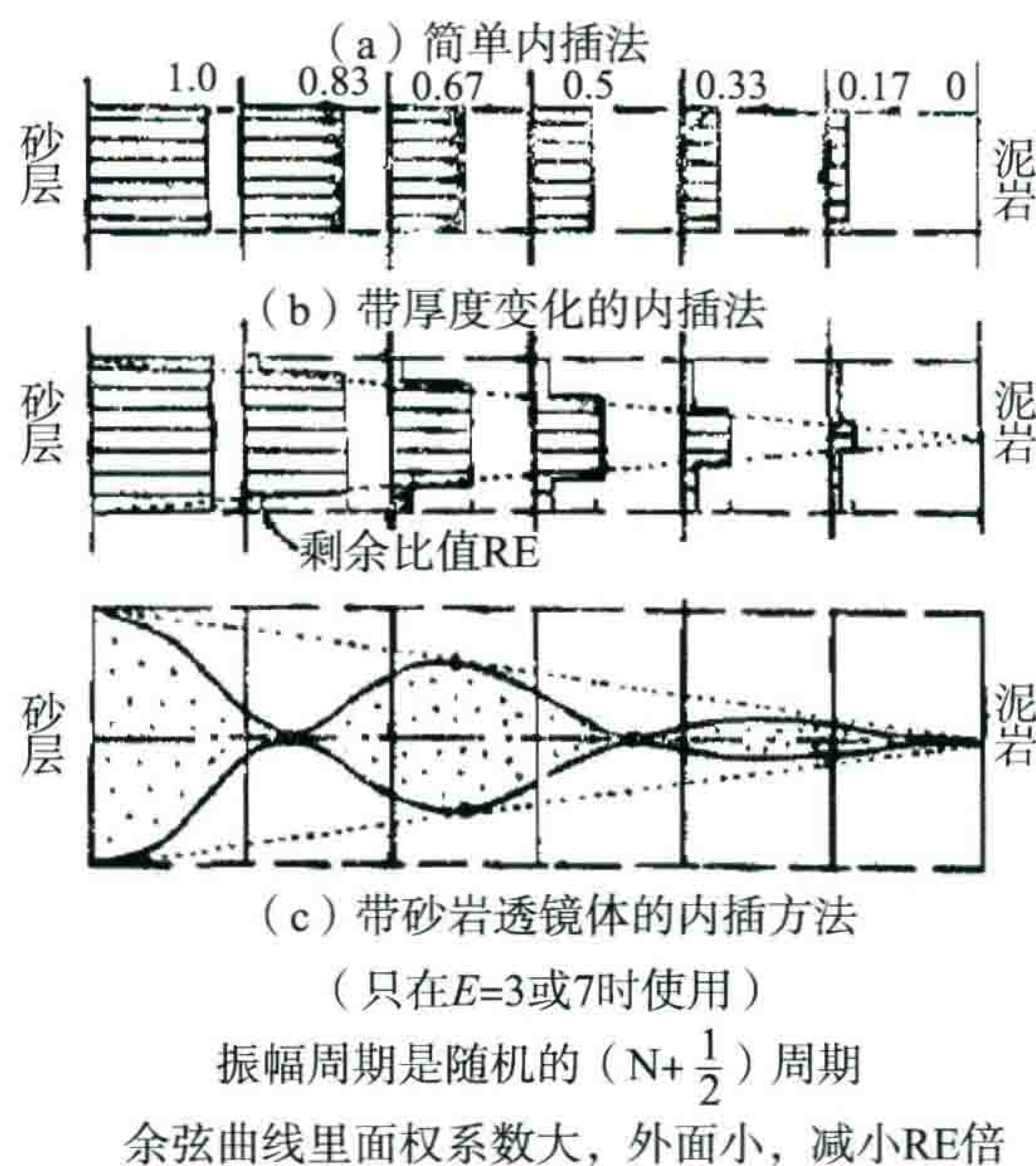


图 6　砂层内插时的几种加权系数形式

(7) 内插完所有段以后，就自动输出结果记盘。此后如果右方再有一口井，就可以接着向右再连着内插砂层，并且第二次的所有控制参数及分层数据都是可以重新定义的。这样就可以输出一条由许多井控制的、很长的内插砂层剖面。

三、程序使用时需注意的问题

(1) 维数规定：本程序输入两口井的井柱子最长为 910 个样点。在两井之间最多可以内插 19 道，共计输出 21 个道。如果你要内插更多的道，例如 80 道，则可以先用两口井内插出中间 3 个道，成为 5 个道，再

把 5 道内的中间 3 个道分离成单道数据，在每两个道之间再运行本程序一次，每次内插 19 道，就可以连接成为 81 个道的数据。

如果输入井柱子长度超过 910 个样点，则需要修改维数语句。

(2) 最多可以输入 50 个地层对比的数据对子(其中包括 10 个不整合而式断层面)。砂岩内插的指向及厚度变化规律，是由这些地层对比数据对子所决定的。由用户先左后右以采样点序为单位输入这些数据对，即用户需要把井柱子的深度数据改换成采样点序。在此程序中，第一个数据的采样点序为零；最上面第 0 内插段的顶界起始点被默认是左右都为零；最下面被默认为井底最后一个数，此数在文件头中被读进来。

在输入对比数据对子的时候，注意左右两边各自相邻的两个数的差值(即内插段经拉伸后的长度)不得大于 320 个点，也不得小于 1 个点。如果相邻的两个数值相同，就意味着这里是一个断层通过，如图 4(A)中的 4 及 5 和(B)中的 3 及 4。这是一个默契的规定。机器在断层前将作适当的处理(保持砂层振幅不变，厚度可变也可不变)。此外需注意，每个不整合地层层序之中至少要输入两个对比数据对子。

(3) 输入井柱子数据时，注意其中已经假设了砂岩数值大于泥岩的数值。如果输入的数据是泥岩大于砂岩，需要将曲线反过来(乘 −1，再加一个正的基数)。程序要求用户告诉输入数据的大致最大数值 V_{max}，该数值最好稍大一些，以免数据输入中化为整数时发生溢出。程序还要求用户告知泥岩的平均基数 V_m(即泥岩基线，其值最好为零)和砂岩的最小门槛值 V_s，凡大于 V_s 的，即定义为砂岩。当泥岩基线在深、浅层有很大的漂移时，应该先消除漂移影响。

(4) 砂层内插减薄时，有一个 RE 参数。它是图 6 中阶状权系数边部和中央的振幅权系数之比值，该比值是砂岩转为泥岩的剩余振幅比值，一般取 0.15 到 0.2 为宜。此外，厚度大于 MH 个采样点的砂层定义为过厚的砂层，程序将它划分为上下两部分。变量 MH 在语句第 10 条中作了规定，为 20 个采样点，如果不同意此数，可修改此语句。

(5)在内插过程中，机器自动对指数参数 P_L 及 P_R 作随机变化，PA 参数是控制随机数产生影响之大小的，即 $P_{L,R}=PA\cdot(0.5+RND)$。式中 RND 是机器自己产生的随机数，其数值在 0 到 1 之间。若 $PA=1$，则 $P_{L,R}$ 将取值在 0.5～1.5 变化；令 $PA=0.7$，则左右横向振幅衰减都将变慢；令 $PA=1.5$，则砂层振幅衰减就快，尖灭也快。

在采用非自动化内插时，用户输入左右指数参数 PP_L 及 PP_R，计算机在此基础上加上 1/3 的上述随机变动，达到对每个砂层小范围调整参数的目的。

(6) 内插出来的最后结果可以用我们的多道波形作图程序在打印机上打出图形曲线来。图 7 与图 8 是两个用该打印程序所作的砂层内插结果，其两边为控制井井柱子。

(7) 本砂层内插程序运行速度是不慢的。不过使用时最好还是对它作 BASCOM 编译(加 8087 的更好)。一次 19 道内插工作在两三分钟内可以完成。

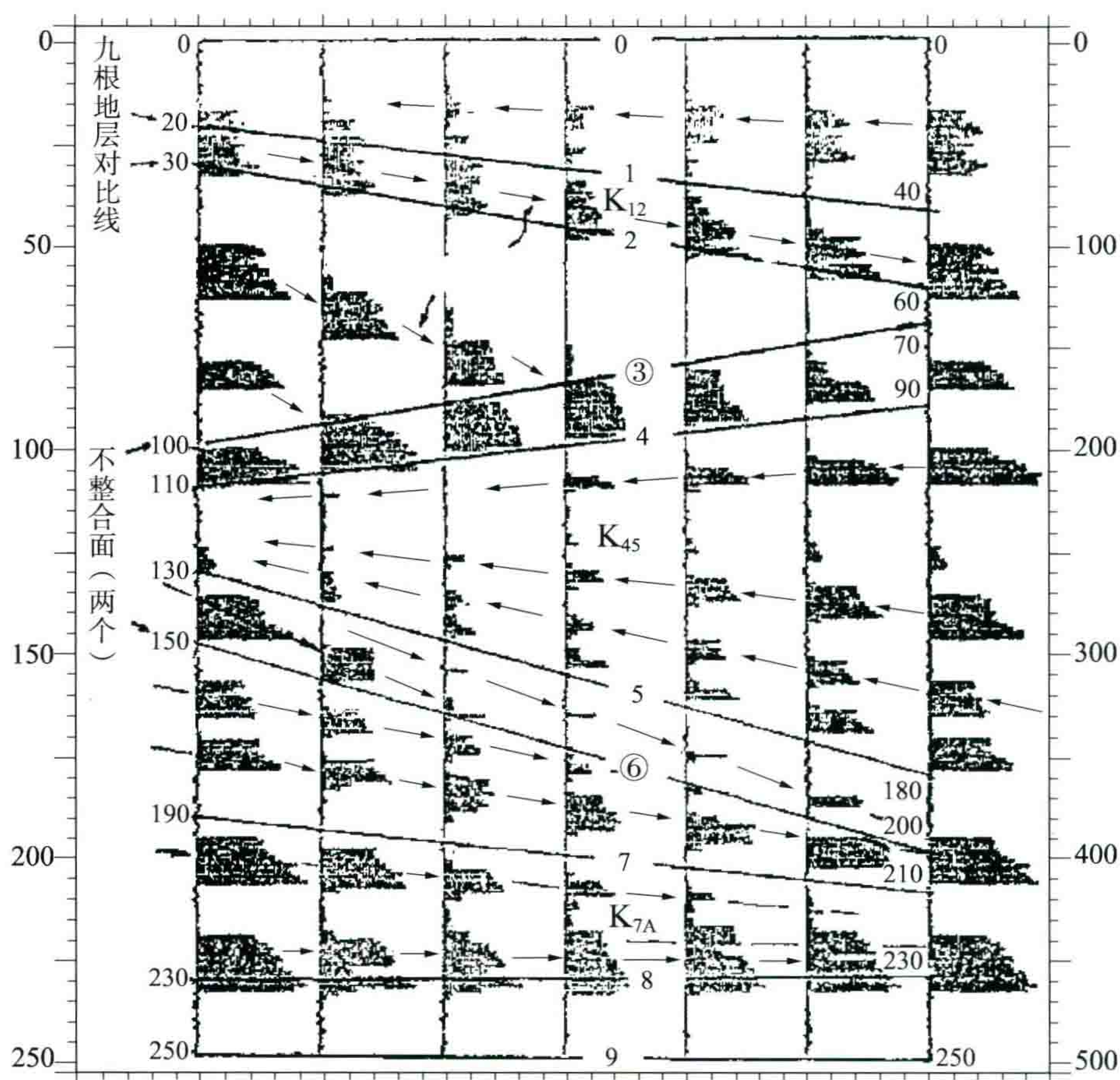


图 7　采用砂层对比内插程序 SANDINTE 的结果实例 Ⅰ

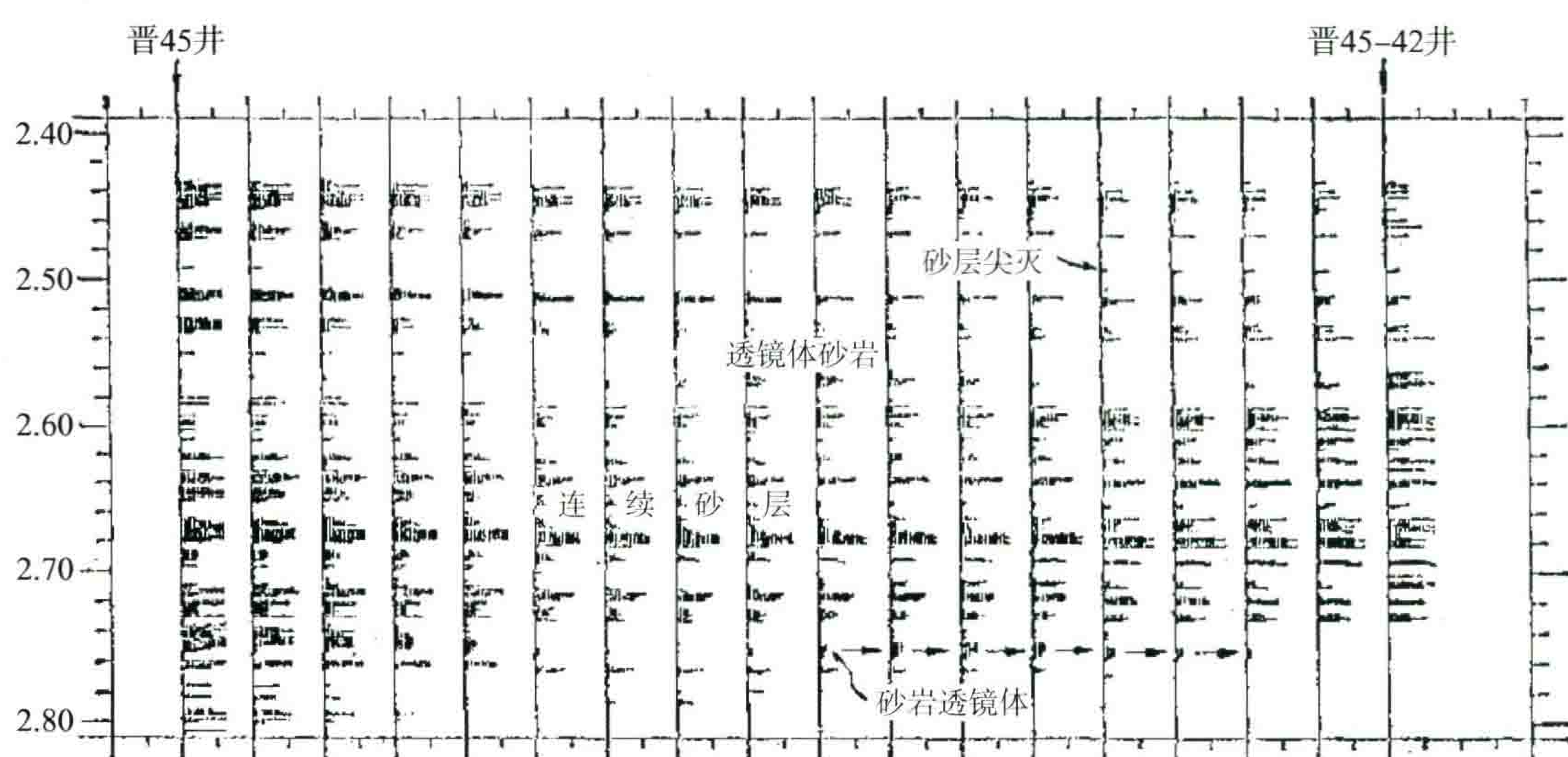


图 8　采用砂层对比内插程序 SANDINTE 的结果实例 Ⅱ

四、改进的方向

从图 7 和图 8 两个例子可以看出，本程序是基本符合地质规律，且具有较大灵活性的内插方法，使用效果是满意的。但是，由于处理中是由机器产生一些随机数来控制参数的局部调整的，所以其内插结果只能说是大体上符合地质规律的一组可能的答案，不是唯一的正确答案。尤其是砂层的尖灭点位置及透镜

体位置是任意的(只能定性地说,经过小层对比,这里必然有一层砂子要尖灭),目前还无法给出有效的限定条件。当然,我们可以多次运行此程序,从统计的规律性来作某些分析,但毕竟还不能根据此结果来打岩性尖灭油藏的探井。

设想是否可以在本方法程序之中加入反射地震记录的某些信息作控制,以实现较有根据的砂层尖灭内插。例如,用G-Log在两口井之间的波阻抗变化率指导P值的变化,或简单地采用保持振幅反射剖面上的振幅变化率、主频变化率等信息作控制,这样可能会获得较合理的砂层剖面。总之,这是值得改进的方向。

圈闭分析的三维分析技术 TRAP-3D

在 304-1《圈闭分析技术》一文中，我早就意识到想要做好复杂断块的圈闭分析，必须把该技术发展到三维去。

1989 年，我在美国期间，利用业余时间，开始编写三维圈闭分析的 FORTRAN 程序 SCHA-32. for。但还没有机会对程序的有效性做出检验，并且解释工作站的断层文件也无法编写出来，于是这项工作停顿下来。

2011 年 8 月，我有一个月的休假，在青岛八大关的锦绣园酒店里，我夜以继日地反复用不同模型，用不同程序作三维圈闭分析试验。结果"屡试屡败，又屡败屡试"，最后开辟一条新思路，完成了 TRAP-3D 核心程序 SCHA-50. for 和 10 多个特殊图幅显示程序。此程序可以计算复杂断块油田及岩性油田的圈闭量，绘出"甜点图"，还可以在已经打井的区块里，计算未动用储量及死油区。

此程序包的输入数据是岩性加断层的三维 Cube，它比"一图一柱法"高明得多。本方法可以在测区内把构造圈闭，断块圈闭，及岩性圈闭，包括地层圈闭，统统找出来。

本文讲解三维复杂岩性断块构造模型的构成过程及三维圈闭分析技术及 TRAP-3D 软件功能。

一、圈闭概念

圈闭概念是石油地质理论最基本的内容。圈闭评价在石油地质理论中占有重要的地位，然而长期以来，它还停留在老概念中，即对于背斜构造还停留在以构造隆起幅度和构造面积两项作为主要评价内容，没有圈闭体积、圈闭量的概念。

下面两个简单的背斜构造哪个圈闭量多？

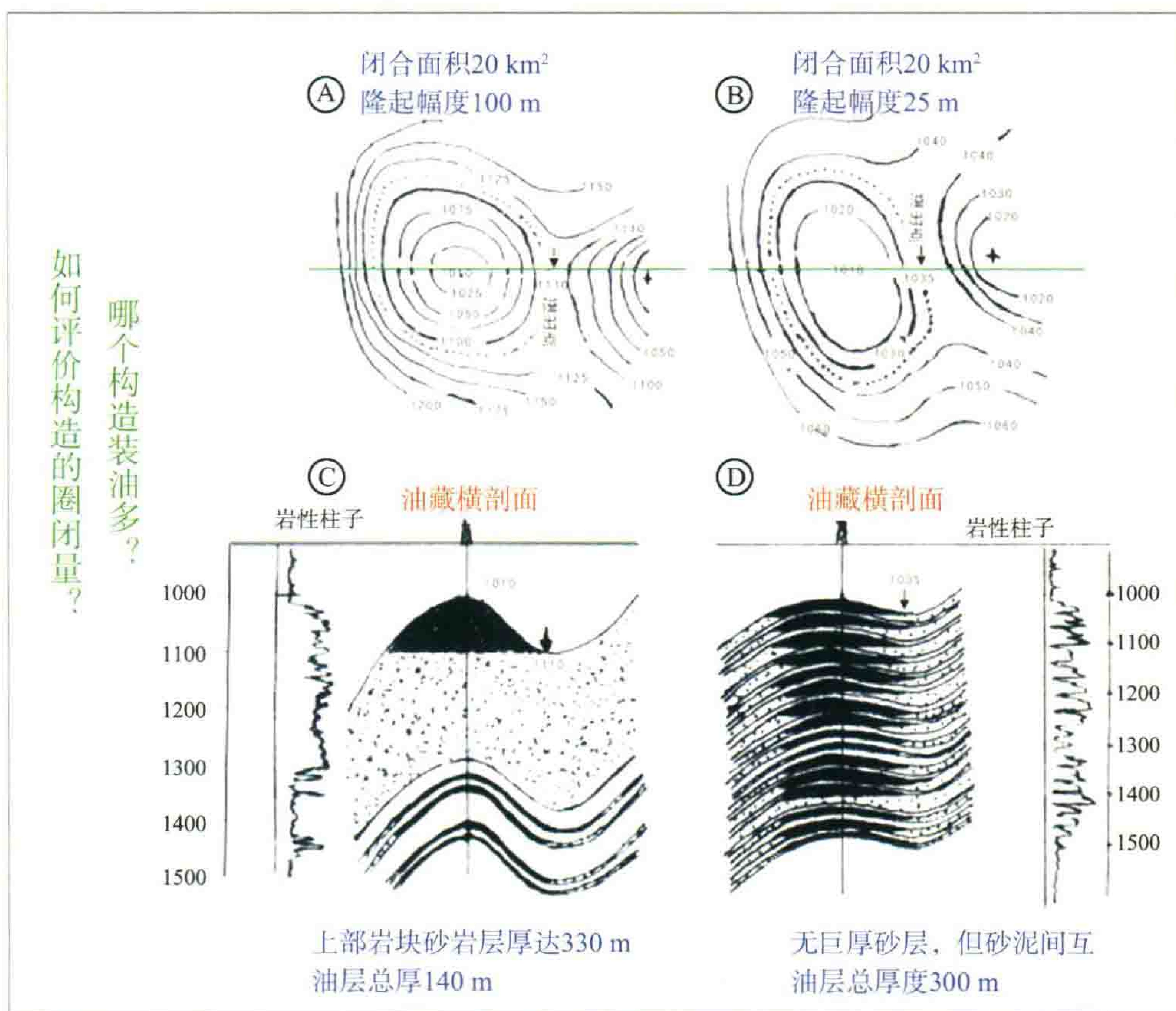


图 1 简单背斜构造的圈闭体积估算

（一）断块油田的圈闭面积更是没有人说得清楚

在勘探断块油田时，断块的圈闭面积更是没有人说得清楚，于是只好根据断块的面积大小，加上主观的判断，随心所欲地上报圈闭面积。在布井方式上也只能见一个断块往上打一口井，不管这个断块是否有圈闭条件。好在断块油田中打井往往东方不亮西方亮，上面无油下面有，有时还“歪打正着”，会有新油层的发现。这样就造成了断块油田勘探上的长期的盲目性。

笔者在胜利油田地质处的长期工作实践中，深感断块油田的“圈闭”一词缺乏明确的定义，圈闭体积或圈闭量的概念还没有人仔细地考虑过，因此有必要对此问题作深入探讨。

长期以来，搞构造研究的人与搞地层、岩性、岩相的人是相互独立地开展研究工作的，殊不知圈闭量一词必须将构造和地层联系起来，才有意义。没有储集层的构造是“空心构造”；储集层很厚而隆起幅度很小的构造是“水漂构造”。

（二）初试圈闭分析

1986 年，我尝试了对断层的封堵系数、储集系数作某种计算，探讨了一维与二维空间的封堵量计算，从而对断块油田的“圈闭概念”有了新的认识，并在此基础上总结出“一图一井分析方法”，尝试应用在东营、广利和荆丘油田，得到了很好的地质效果。

当时我们讨论的圈闭概念，主要还停留在以剖面形式表达的二维分析方法。对于复杂连通体的断块油田及岩性油田方面还显得无能为力。

我认识到只要把三维空间的圈闭分析技术的程序调通，就可以更自动化地解决复杂断块的圈闭分析问题，甚至可以在三维数据体中，让计算机自动搜索出所有的背斜构造圈闭、断块圈闭、岩性圈闭以及地层圈闭。

1989 年，我在美国期间，利用业余时间，开始编写三维圈闭分析的 FORTRAN 程序 SCHA-32. for，但还没有机会对程序的有效性做出检验，并且解释工作站的断层文件也无法编写出来，于是这项工作停顿下来。

最近我打算把过去的工作写成文集。在编写到圈闭分析一文时，想到我们的油藏研究中心可能会对我的这项工作感兴趣，于是就跟凌云联系，给他们讲了两次课。

我想让他们接着我的思路，把圈闭分析技术在生产中取得实效。

二、对断层圈闭分析的几点认识

目前流行的商业软件，它们根据断层两侧的岩性，画出上下盘的“重叠剖面”，从而分析断层封闭的方法和我在 20 世纪 80 年代的“一图一柱”二维分析方法一样，只能分析最简单的单断层简单断块，对稍微复杂一点的断块构造就无法奏效。因为三维空间中是否存在圈闭不是由 1 条断层所能决定的，如果砂体两端都封闭的话，那么断层两侧即使是砂对砂依然是封闭的，所以必须从三维空间的切片分析着手，才是解决问题的准确方法。

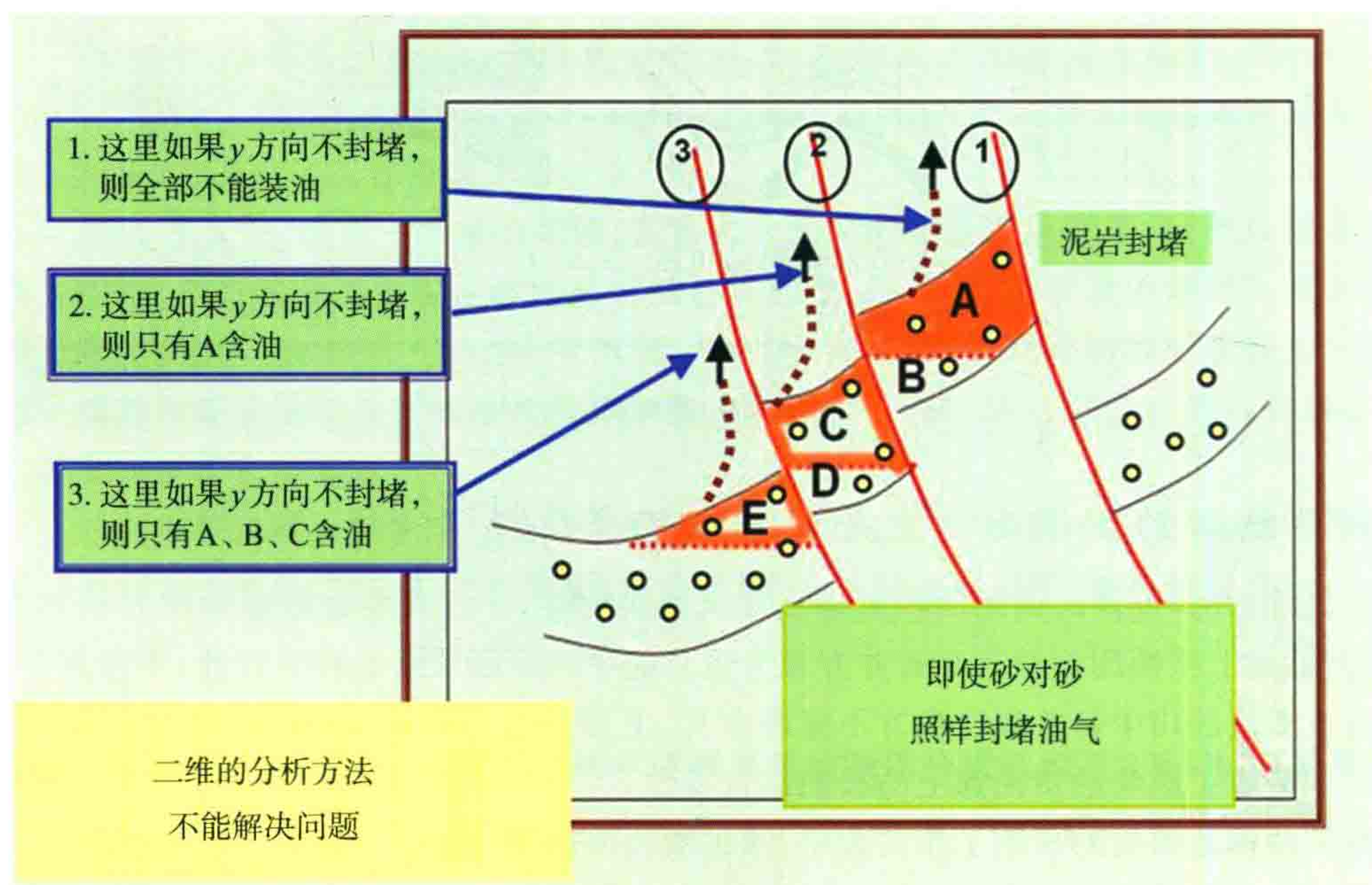


图 2 二维断层面分析不能正确判断圈闭空间分布

圈闭分析程序实现中的几点认识如下。

（1）只有从切片入手，从上至下地逐层分析，分析构造溢出点及断层溢出点，才是合理确定圈闭封闭性唯一准确的方法。

（2）只有将岩性和断层数据都包含在一个文件中，才能顺利地完成封闭性分析。如果将油藏静态岩性模型和断层文件分别放在不同文件中，那么在程序实现过程中将很难对断层两侧岩性进行准确、高效地对比，只有在一个文件中体现断层位置及砂岩、泥岩的分布信息才有利于封闭性分析的程序实现。

（3）只有将岩性参数进行简化才有利于砂岩评价计算的实现。本程序中尾数为 0 代表泥岩，尾数为 1 代表粉砂岩，尾数为 2 代表砂岩，尾数为 3 代表好砂岩，尾数为 4 代表断层断点。

（4）要做好圈闭分析，最好用二进位的办法。这样既能够简化计算，又能够减少对内存的需求，从而提高计算效率。

（5）我 1989 年的程序尚存在缺陷，主要问题是由于扫描搜索方向不同，产生圈闭评价不同。现在可以证明，仅东西向或南北向搜索是远远不够的，而且由于砂点评价是逐层传递的，因而在通过切片旋转方

式来实现多方向扫描过程中，一次扫描错误，即可能导致连通砂体评价的错误。

2011 年 8 月，我有一个月的休假，在青岛八大关的锦绣园酒店里，我夜以继日地反复用不同模型，用不同程序作三维圈闭分析试验。结果“屡试屡败，又屡败屡试”。最后开辟一条新思路，完成了 TRAP-3D 核心程序 SCHA-50. for 和 10 多个特殊图幅显示程序。此程序可以计算复杂断块油田及岩性油田的圈闭量，绘出“甜点图”，还可以在已经打井的区块里，计算未动用储量及死油区。

此程序包的输入数据是岩性加断层的三维 Cube，它比“一图一柱法”高明得多，也不需要地震构造图了。

三、新思路

(1) 从切片中每一块砂饼入手，给每个砂饼起一个 ID 序列号，按号给评分，建立序列文件。第一次初步建立 ID 序列后，序列与序列之间还有连通的，还有重复的，需要复查。我又建立了一个“砂岩连通库”，把连通的砂岩 ID 再加以合并，使每个连通的、被泥岩包围的、为断层所隔断的独立砂体都具备一个唯一的 ID 序号。这是程序中的关键。

那么，什么是砂岩联通的定义？先谈砂岩连通性的判断准则。“十”字形与“米”字形连通判断法，参看示意图 3 和图 4——**从砂点（点），砂条（线）到砂饼（面），再到 3-D 中立体的砂体（体）。**

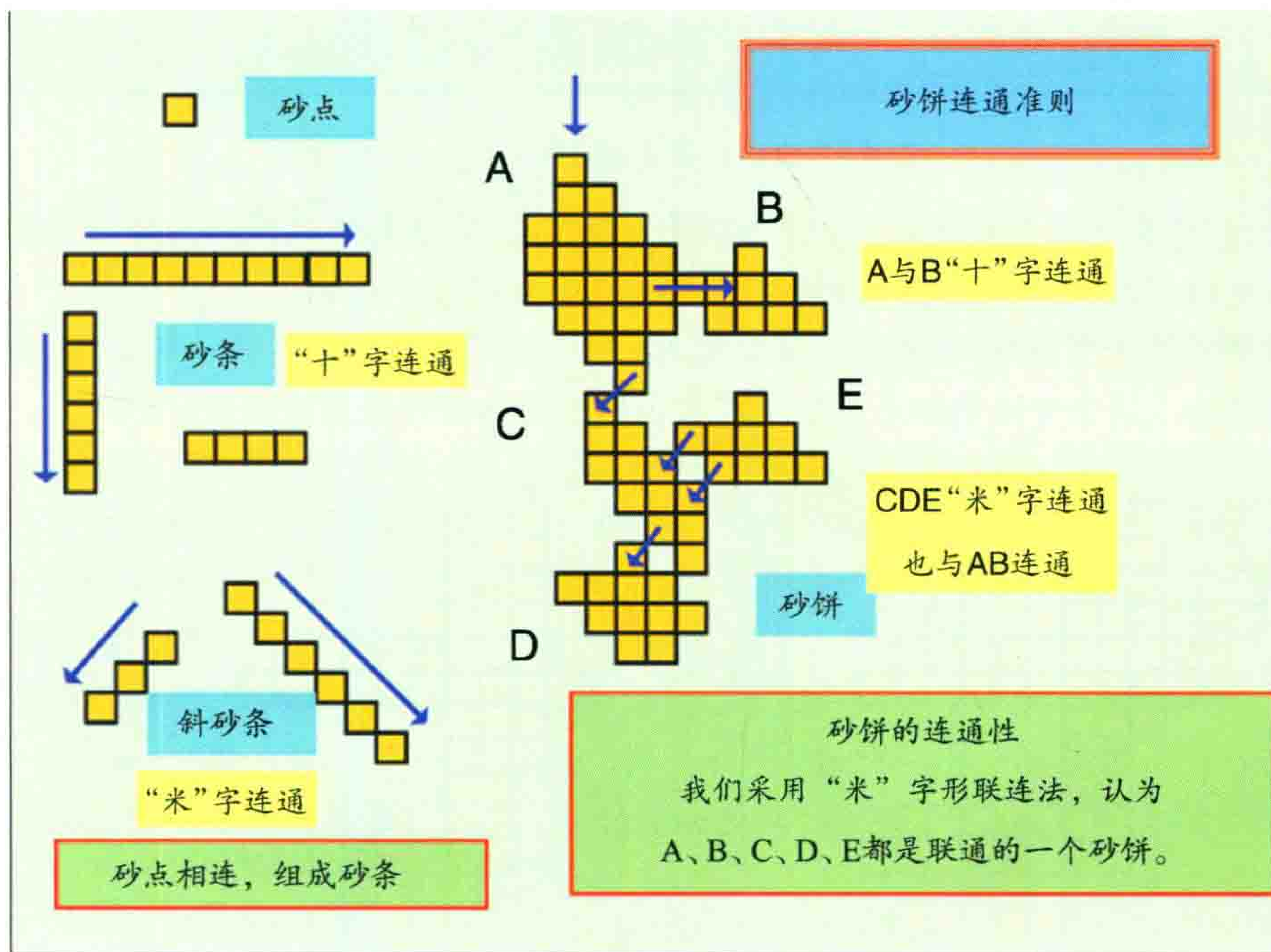


图 3 砂饼连通准则判断示意图一

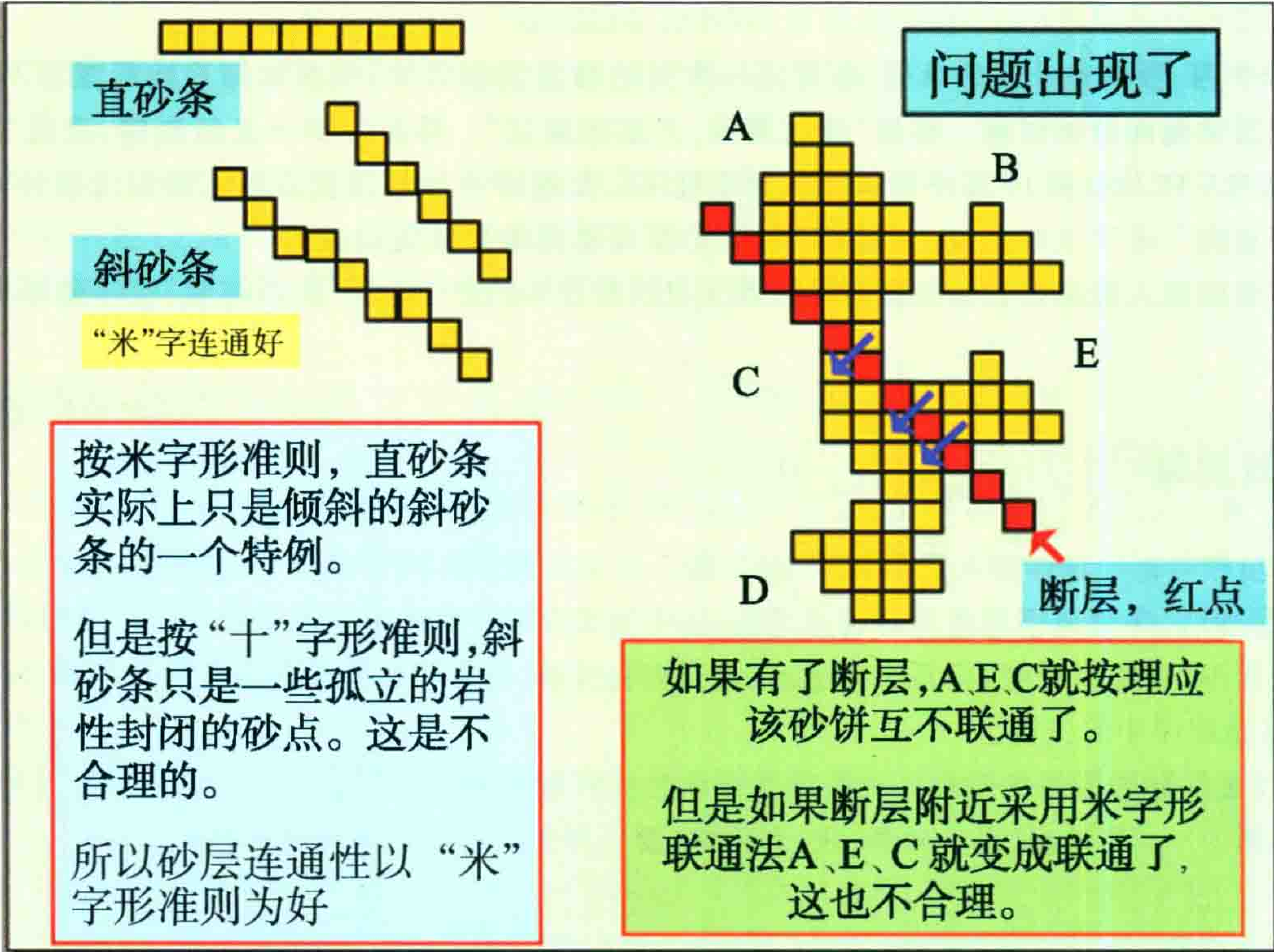


图 4　砂饼连通准则判断示意图二

我们已经想到，砂饼连通性判断以"米"字形为好，否则，斜砂条会变成孤立的砂点。如果断层点的连通性也使用"米"字形判断，就会使砂层跨越断层，如上图。这是一个难题。

解决这个难题的第一个办法：把断层线横向延伸一个点，即变成双线。换一句话说，就是让断层连通准则使用十字连通法。这个办法的缺点是断层点数占用了很多岩性指数的位置（图 5）。

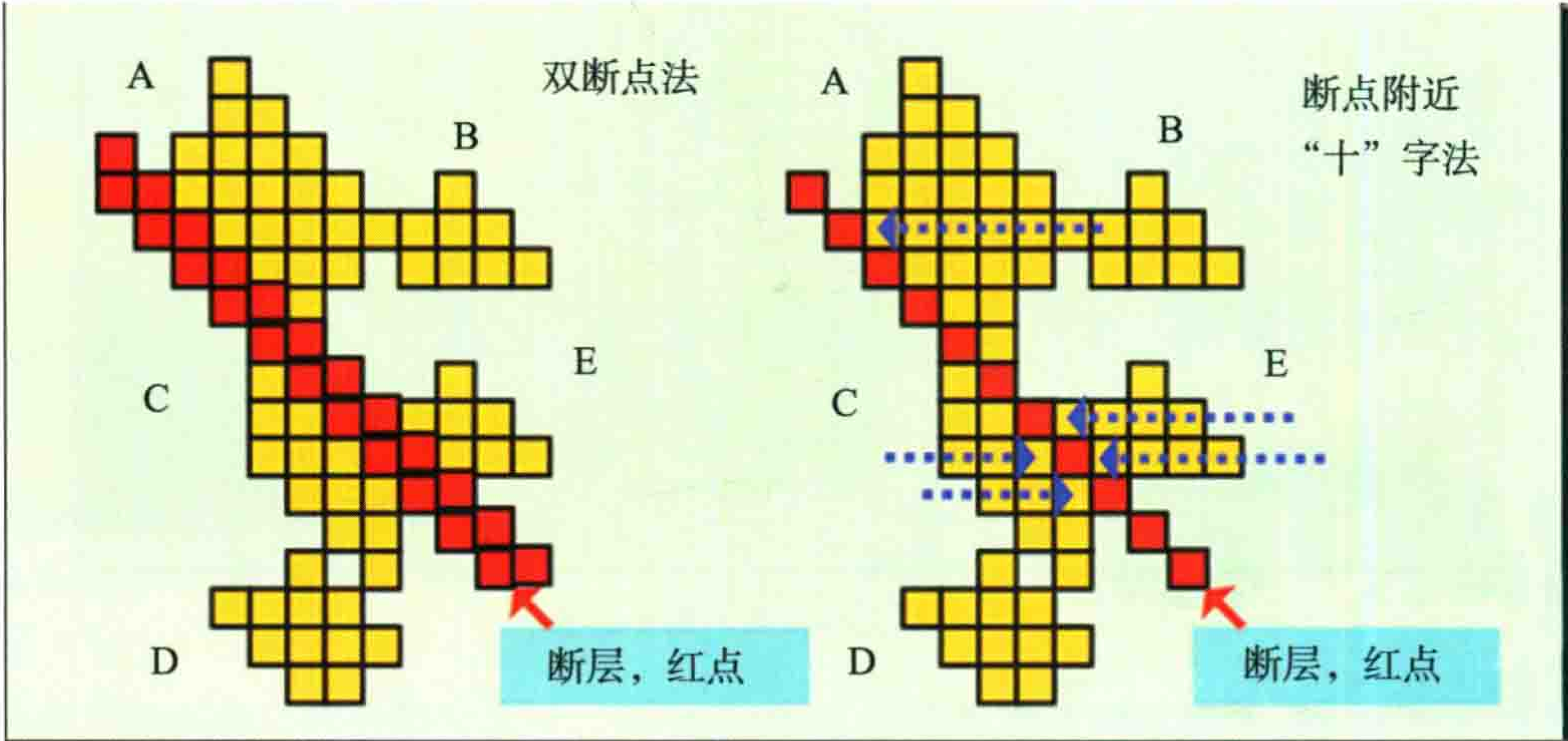


图 5　砂饼连通准则判断示意图三

十字形与米字形连通性的结合，这是第二个办法。砂饼连通性还是采用"米"字判断法，但是在每个砂条碰到断点时，局部采用"十"字判断，这样就不会斜向跨过断层了。它是比较合理的方法。

（2）为了划分砂体的连通性，是一个困难的问题，"'十'字形连通识别法"会漏掉连通的砂子；"'米'字形连通识别法"效果较好，但是遇到单断点时，又会跨过断层，造成对断层漏失量的误判。最后，我设计了一个 FINDSAND 子程序，既可作"'米'字形连通"识别，在断层处又自动变为"'十'字形连通"，防止误判。

注意：在检查相邻两个切片之间的砂岩连通性时，对上下砂饼的联通性我们采用的是"米"字形判据，

对上下切片中的断层连通性也是采用“米”字形判据！

只有按“米”字形判据，单点的斜断层及立体中的斜断层才可以认为是一垛不透风的墙。

（3）下切片中每个砂饼只在它上方切片搜索上方的评价加以传递，并且是采用统计性的传递子程序MVSTATICS，避免偶然性的评价传递错误；又不能漏一个砂点，否则会造成连续的错误（图6）。

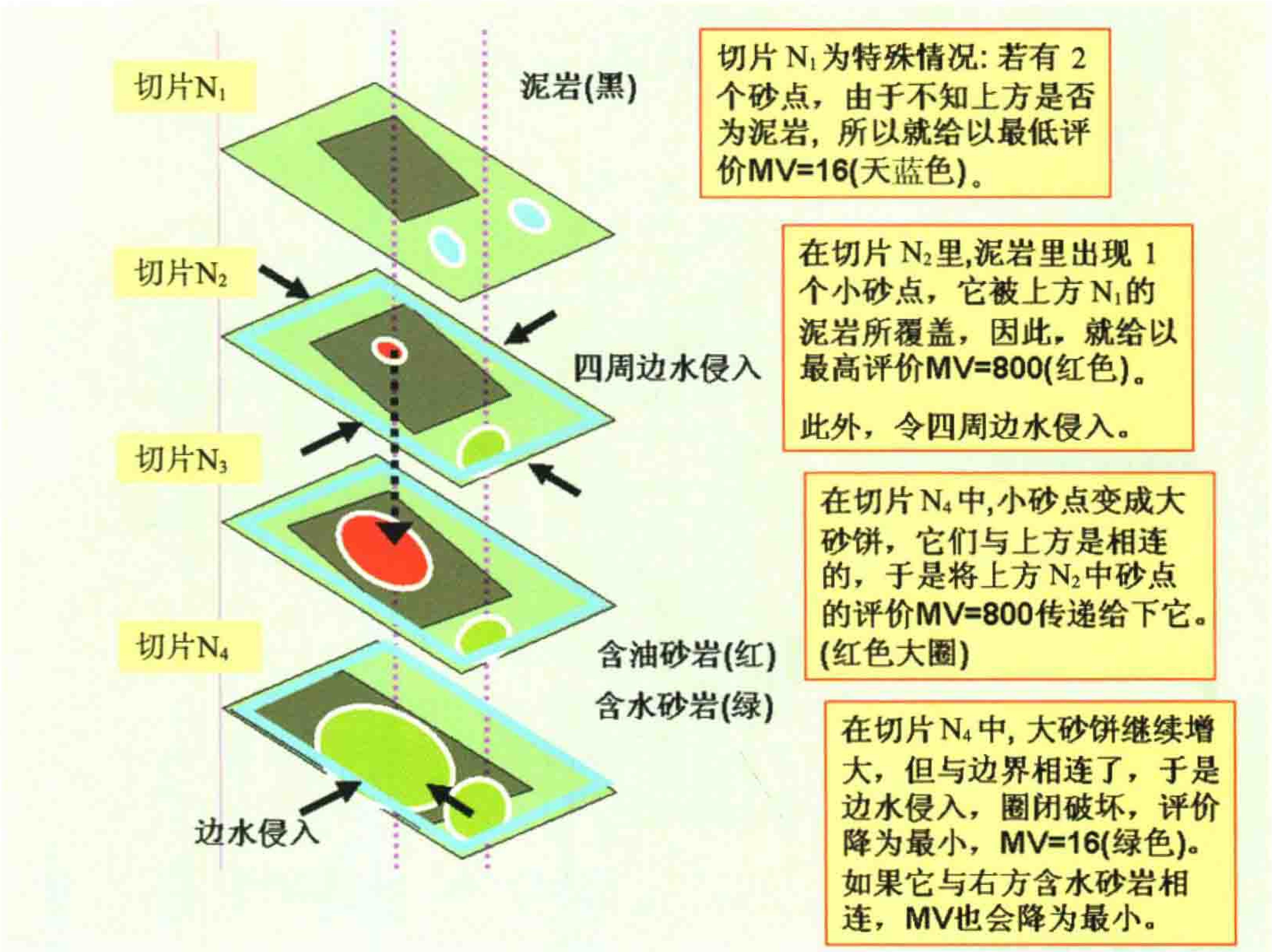


图6　用上下切片里砂泥分布情况进行圈闭分析原理

（4）对断层漏失及泥岩涂抹作用的判断过去只是按某一个方向按点扫描作判断，不能避免结果与扫描方向有很大的关系。东西向与南北向结果不同。现在有了ID序列，就可以对某砂体与四周的关系作全面分析，分析后再给予统一的评价，不会受扫描方向的制约了。这就需要建立一个**“断层文件库”**，把每个断点的两侧岩性，两侧序列号，及两侧评价MV，都记在档案中。将每个砂饼按序号查阅档案，搞清断层对面的情况，是砂便减分，见泥就加分。搞清情况后，统一对同一砂饼作统一的评分（图7）。

（5）为了检验程序运行的准确性，我做了“砂岩连通渗水”试验。为了满足复杂构造的测试，我编写了SLICESEC、LITHSLIC、SHIFTSEC、SLIC-SEC和SECTX-Y等程序。为了作图显示，我又编写了SLIC-PLOT、BIGSPLOT及COMPPLOT等程序，可以在彩色屏幕抓图。

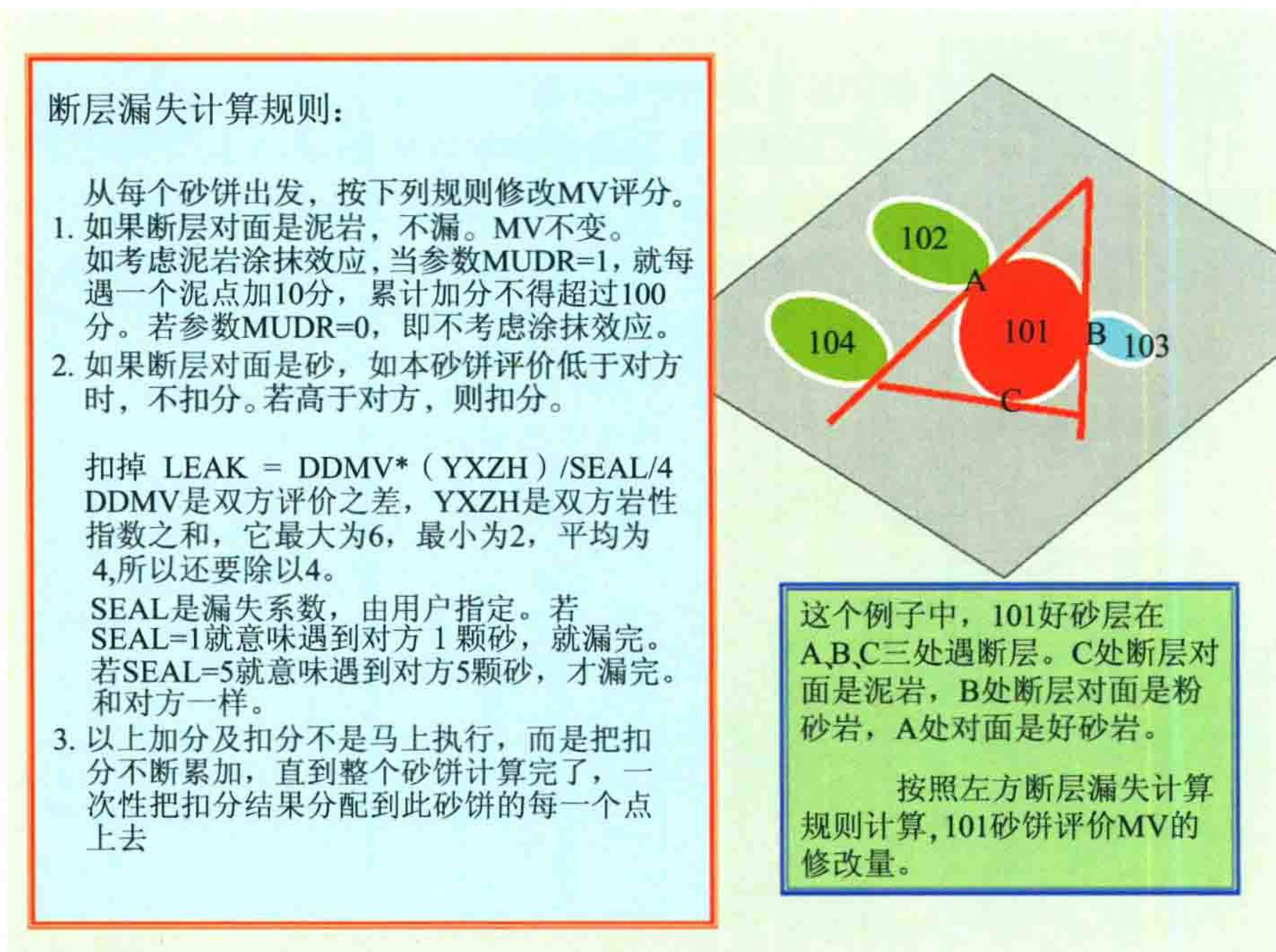


图 7 断层漏失计算规则

（6）现在总的说来，困难已经过去。程序测试效果良好。

从 2011 年程序 SCHA32. for 版本，不断修改到 SCHA-50. for 连续屏幕照相上千张。

测试了模型 8 个，现在终于取得良好的效果。

四、模型测试（1）

简单背斜模型，加一条断层，用程序 SLICESEC. bas 作的模型，输出文件名：SMP，1～100 个切片，构造呈长圆形，向东开喇叭口（图 8）。

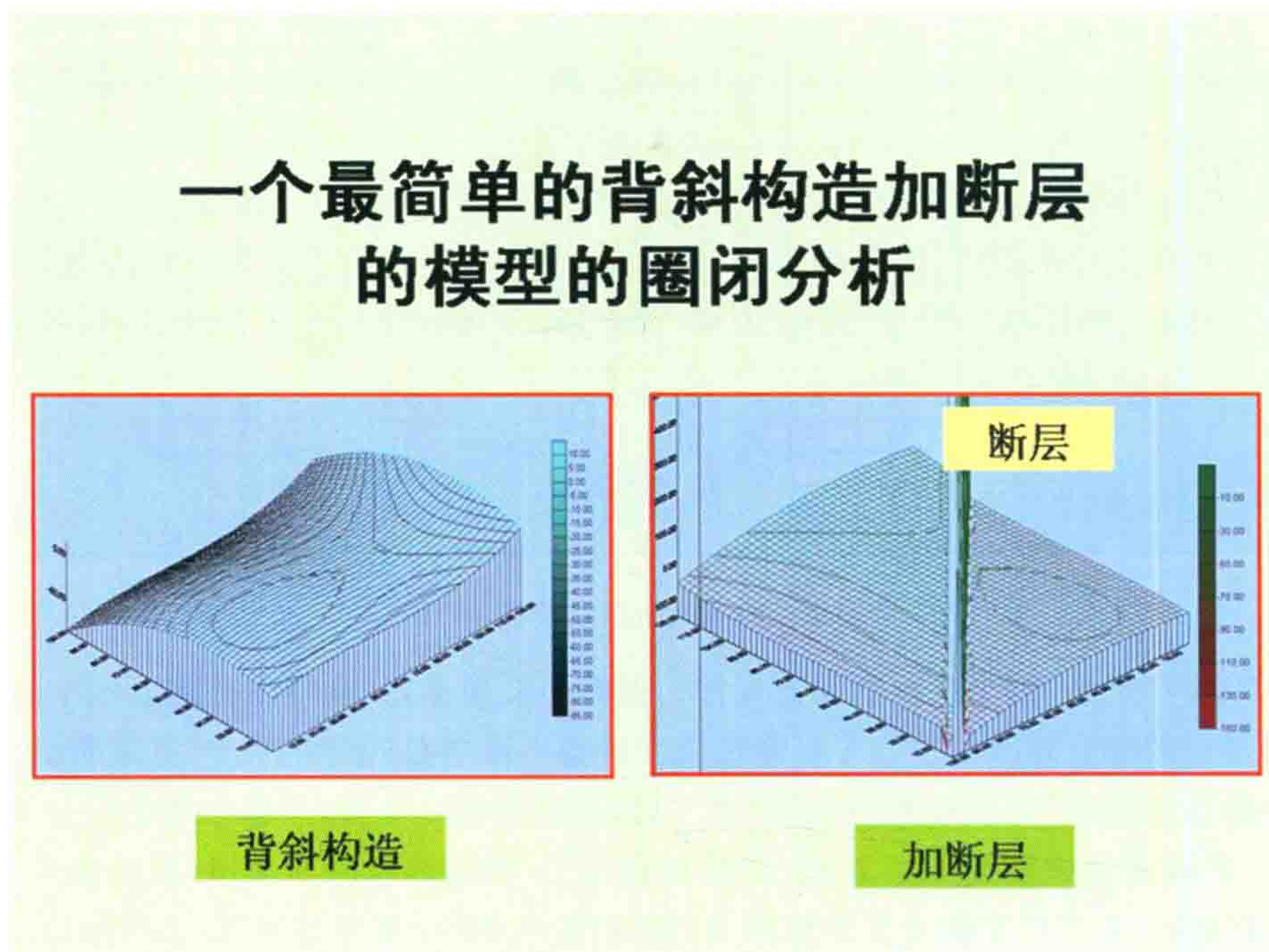


图 8 简单背斜构造示意图

从切片着手的分析计算。

程序名——SCHA-50.for。

以下的图 9～图 12 所显示图幅都是左右两幅。

右边红圈里的数字是切片编号，号码大的是往深度大的方向。你可以通过相邻的切片看到圈闭评价的逐步变化。

左边为岩性指数切片——(0) 黑色为泥岩，(1) 深蓝色为粉砂质泥岩，(2) 天蓝色为粉砂岩，(3) 绿色为好砂岩，(4) 红色为断层。

右边为圈闭评价——深蓝色无圈闭量，红色为最好圈闭，天蓝色次之，绿色为最低评价。

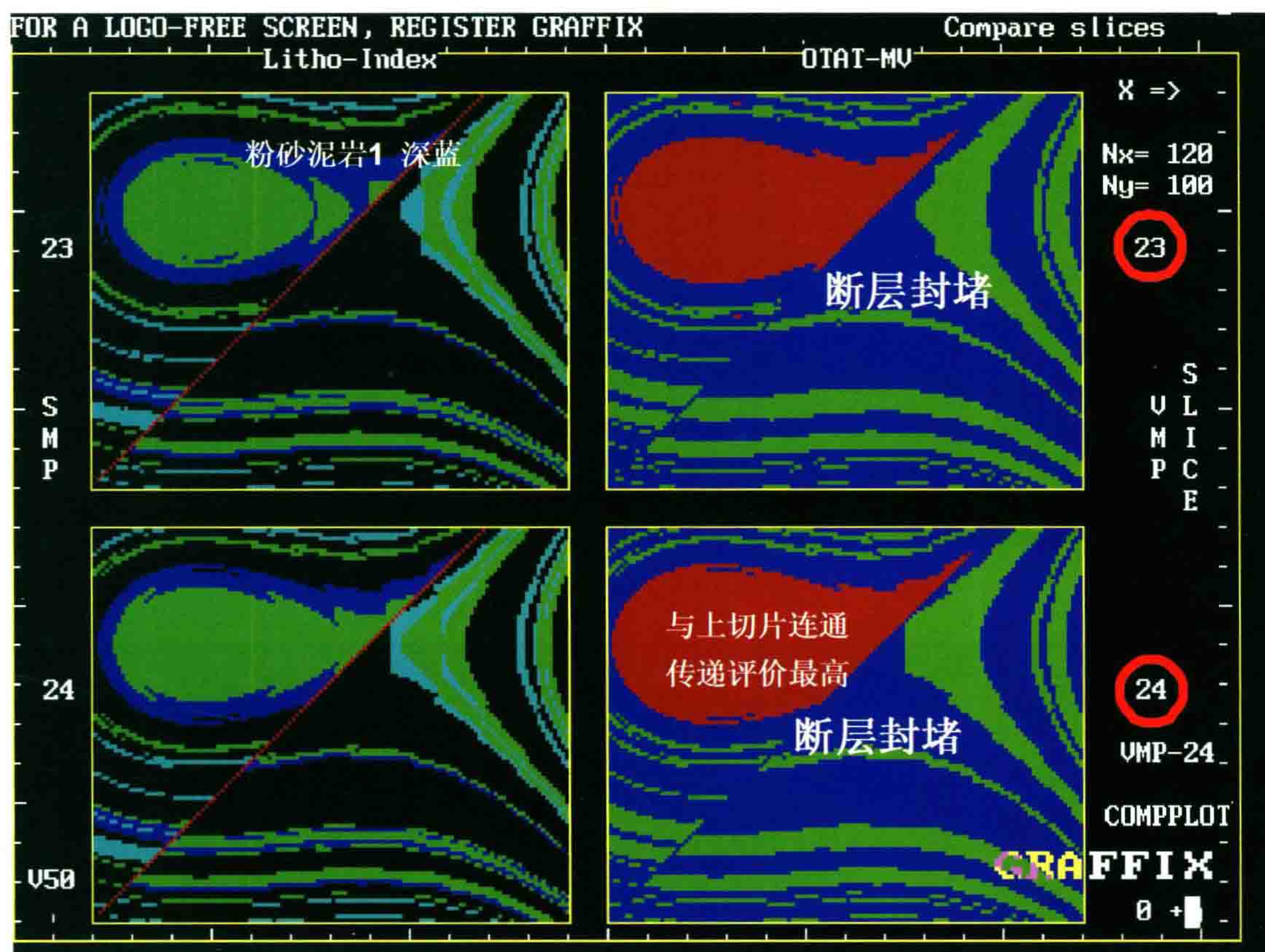


图 9　切片编号 23 和 24

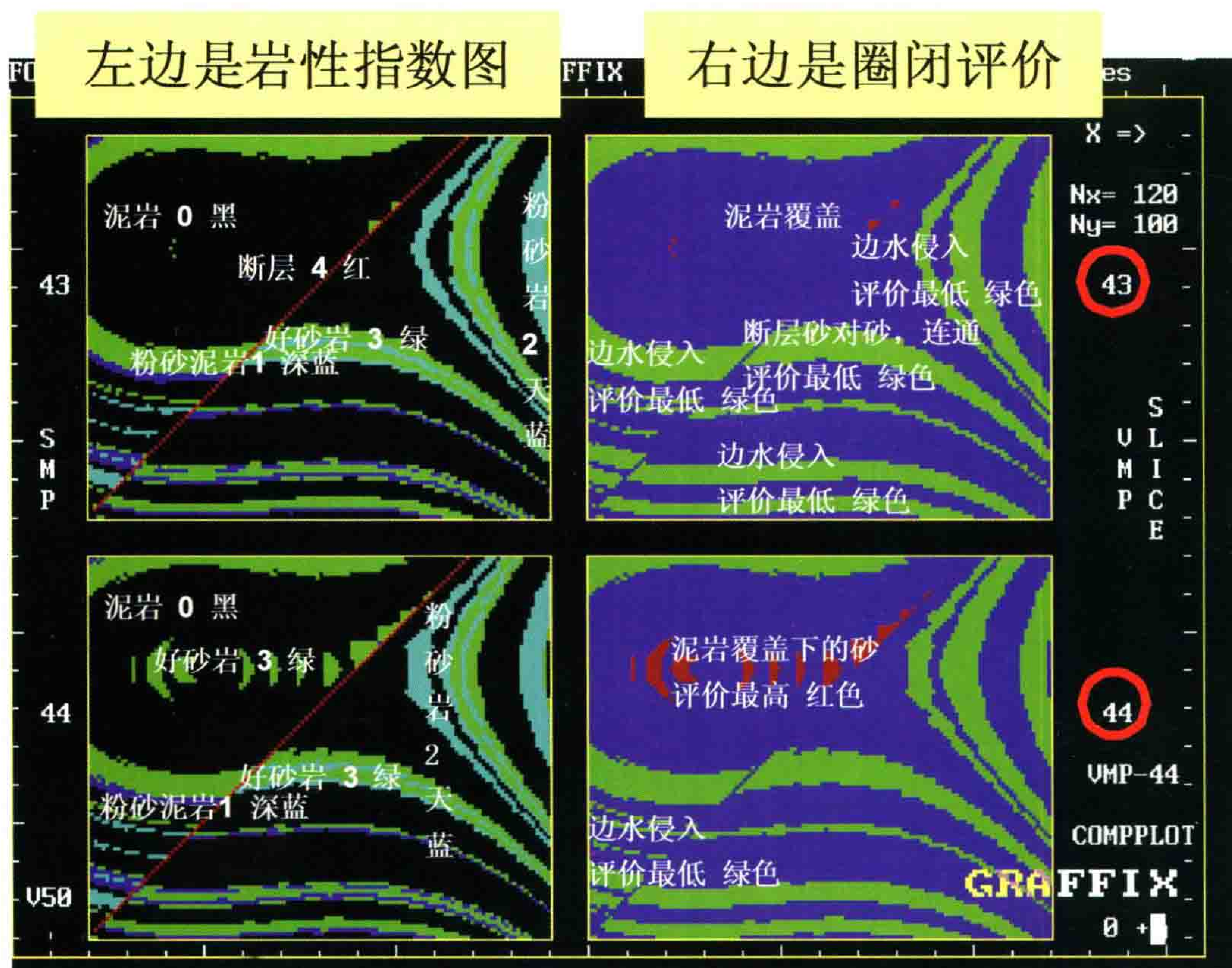


图 10 切片编号 43 和 44

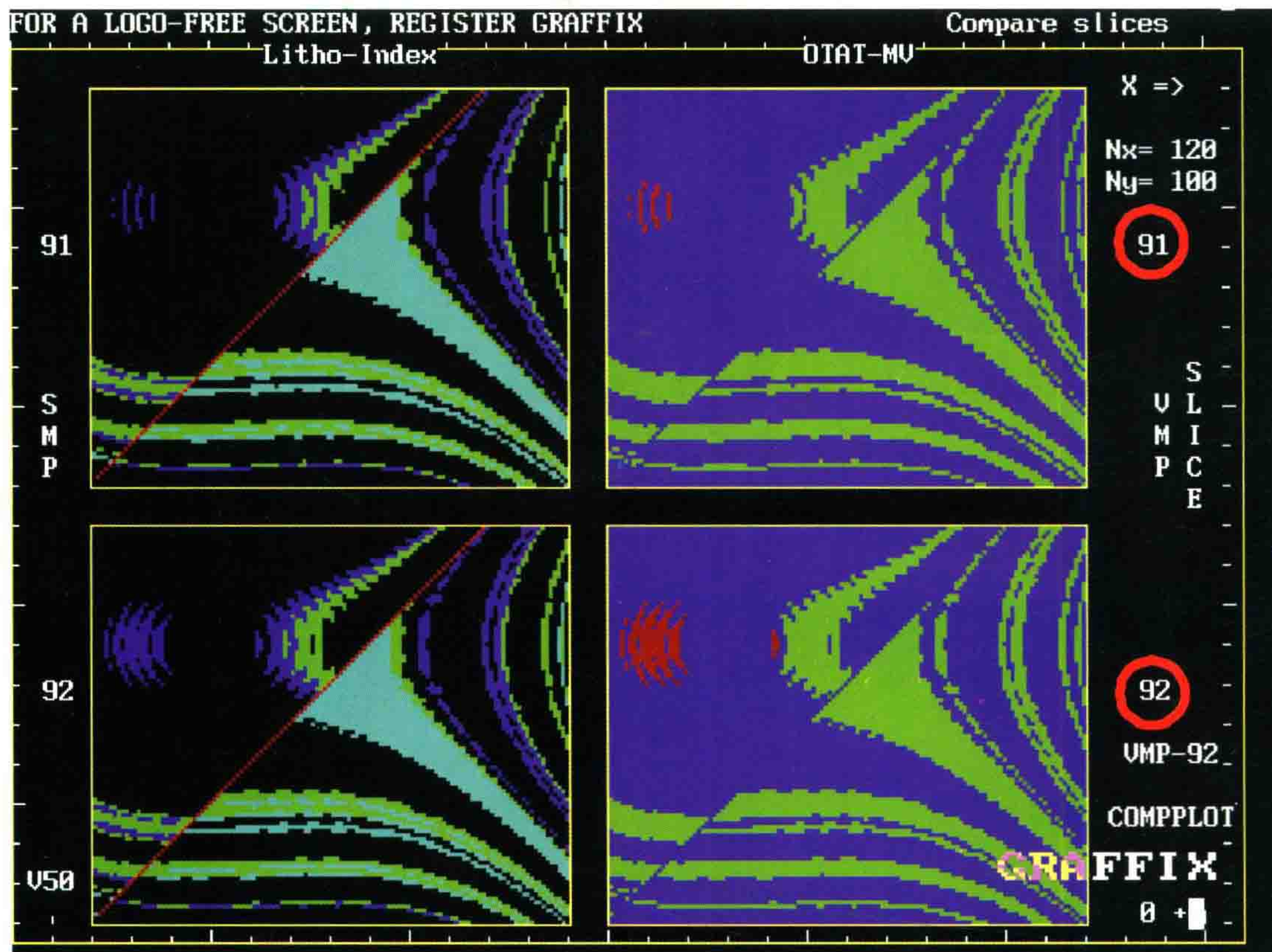


图 11 切片编号 91 和 92

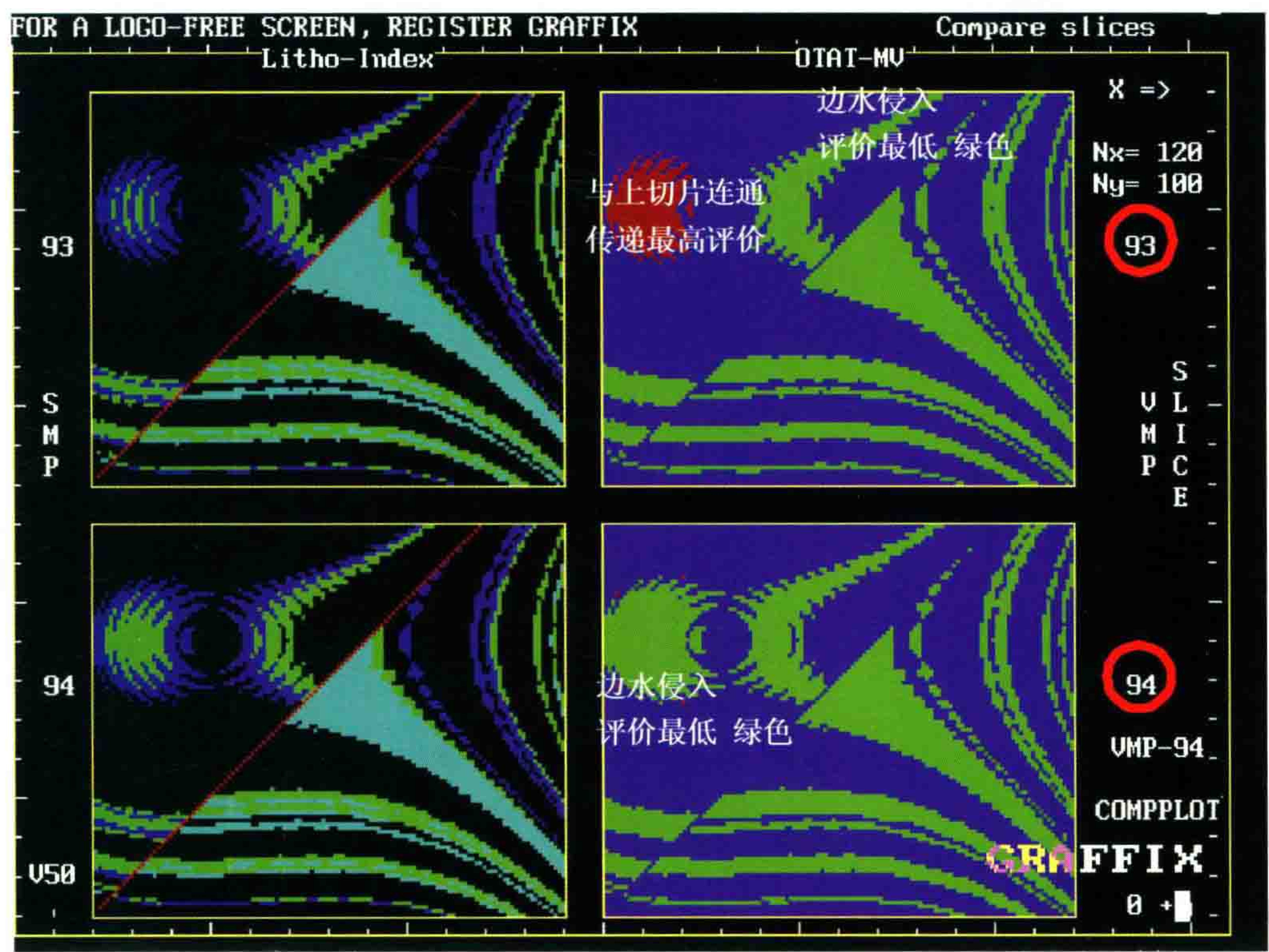


图 12　切片编号 93 和 94

五、模型测试(2)

2011 年 9 月 15 日，笔者用 SLICESEC. bas 作模型的记录，输出文件名：ANM-1-100，背斜复杂断块模型，7 条断层，20 个断块。构造呈长圆形，向东开喇叭口，岩性多变。

图 13 说明了制作构造岩性模型的两条声波曲线及分选成 0、1、2、3 岩性指数的情形。

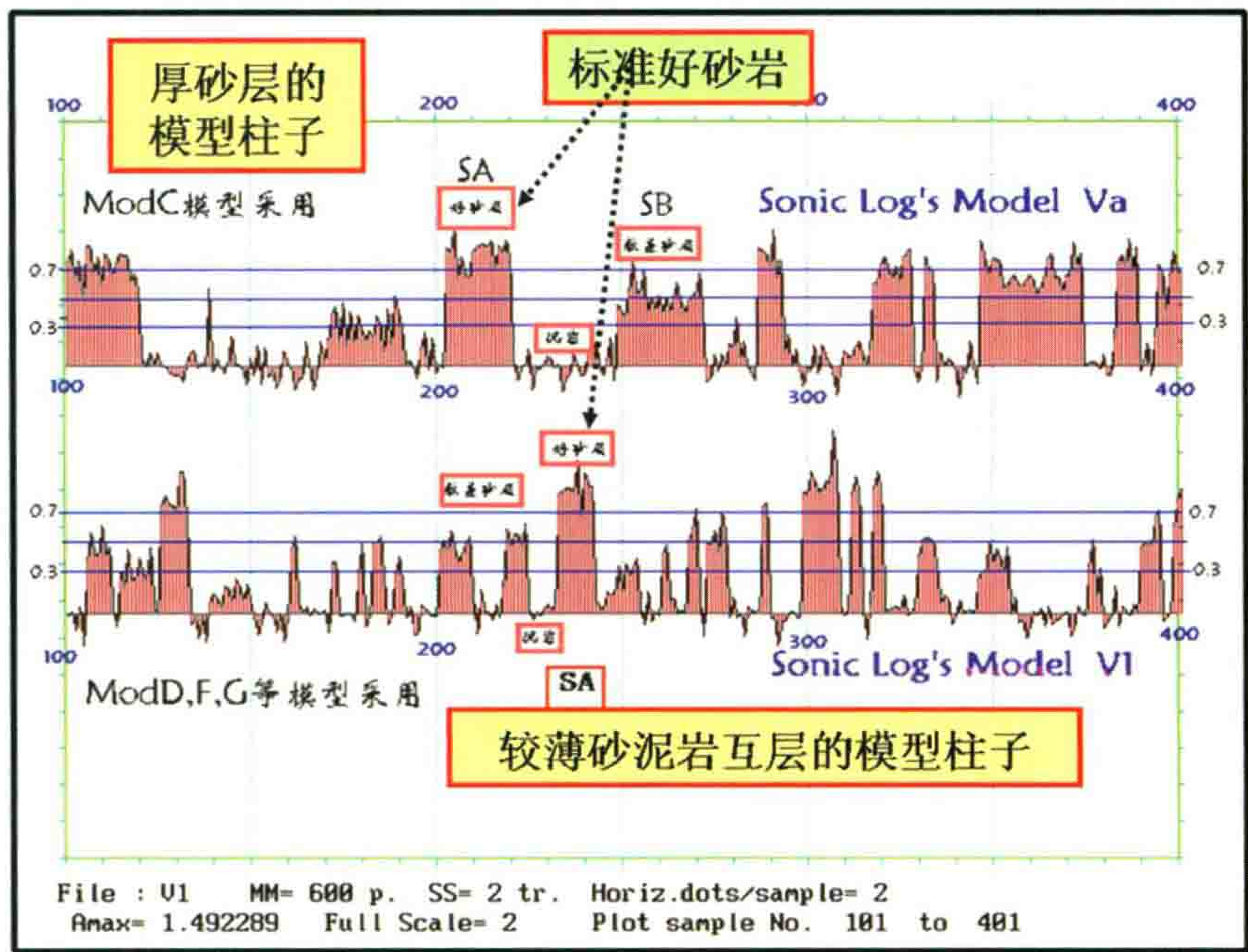


图 13　制作构造模型的两声波曲线

（一）处理流程图

处理流程详见图 14。

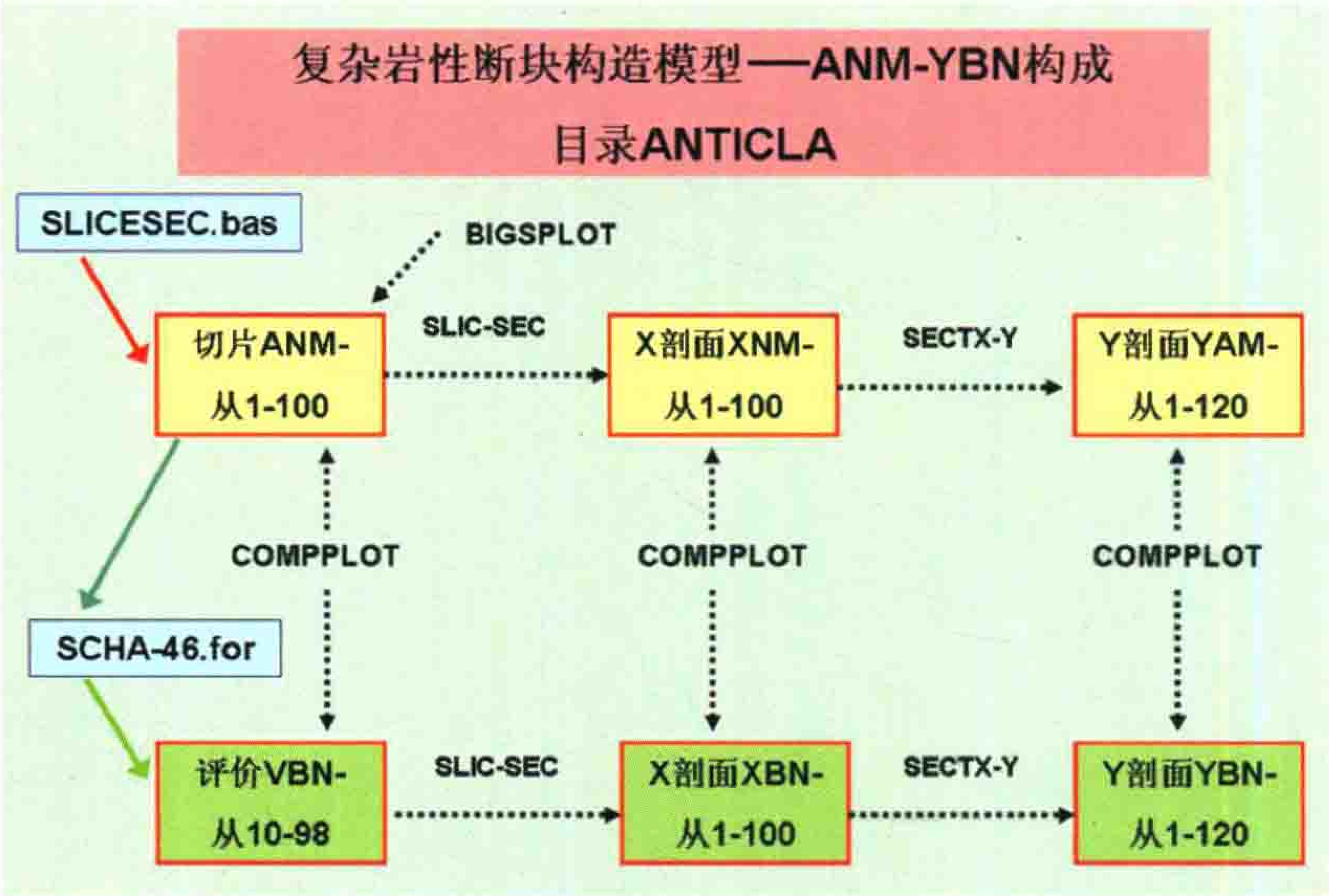


图 14 复杂岩性断块构造模型处理流程示意图

在每一张切片里，对每一个互相连通的砂饼、砂条、砂点进行编号。这种编号在程序实现中，一开始可能不知道它们是相连的。编了号，事后发现某砂条与已经编号的砂条是相连的。这是程序实现的难点。所以，程序要反复检查所有的砂条是否与其他砂条相连，如果相连，就要把它们合并，并且把它们的编号统一起来。最后要使每一个相连的砂饼、砂条、砂点，都具有唯一的编号。通过图 15～图 18 说明这个编号合并的过程。

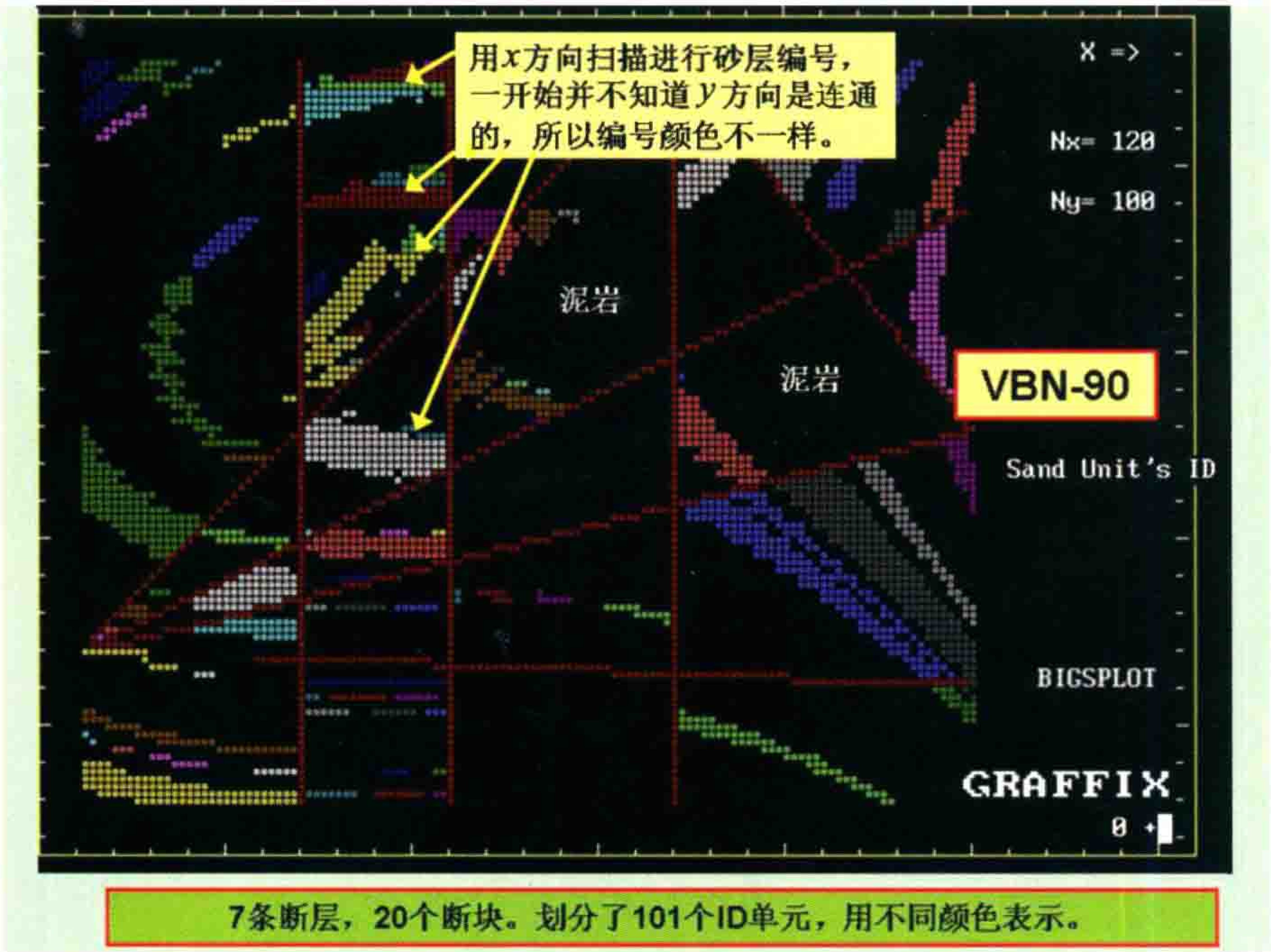


图 15 编号合并过程说明图示 1

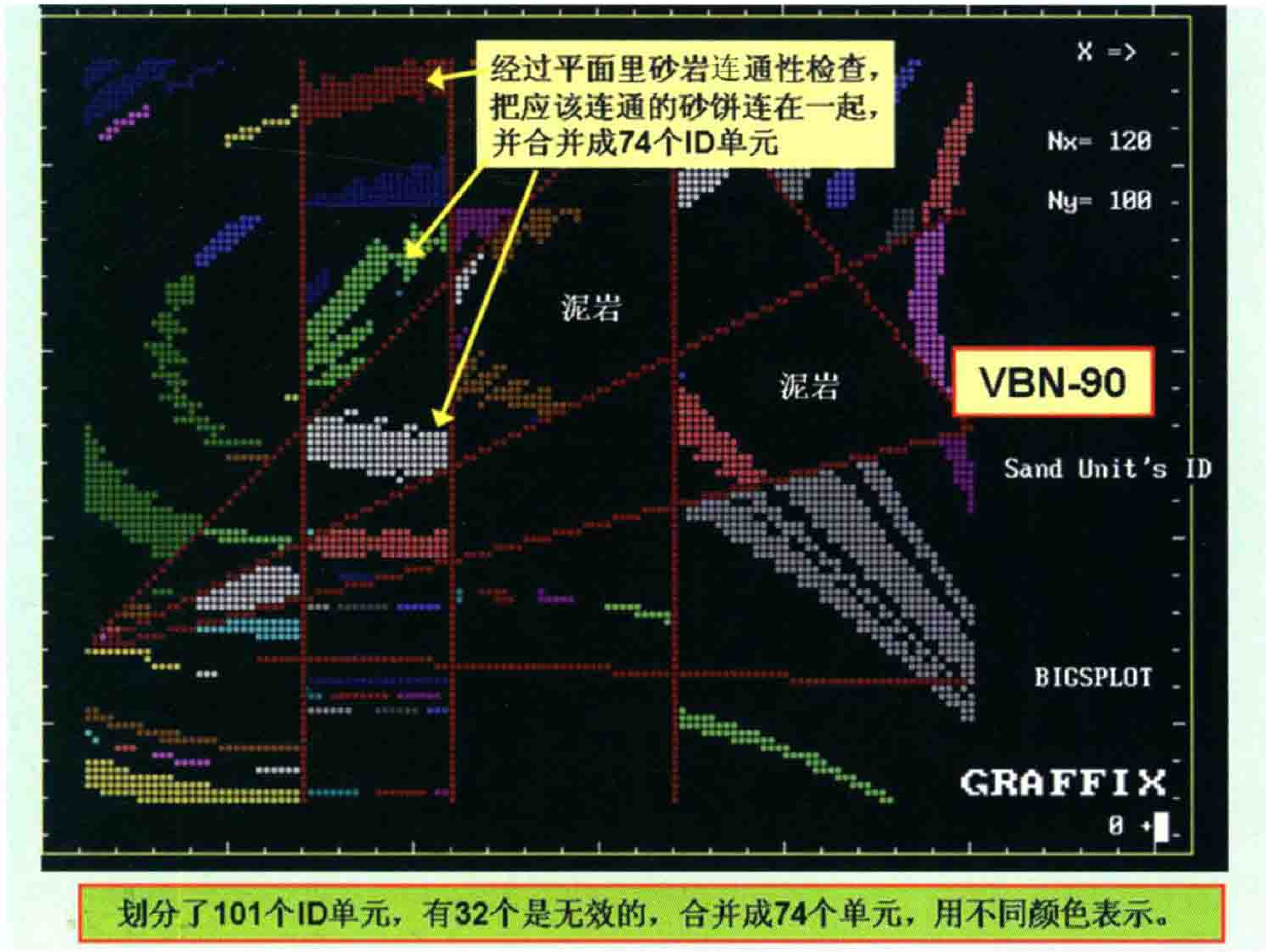


图 16　编号合并过程说明图示 2

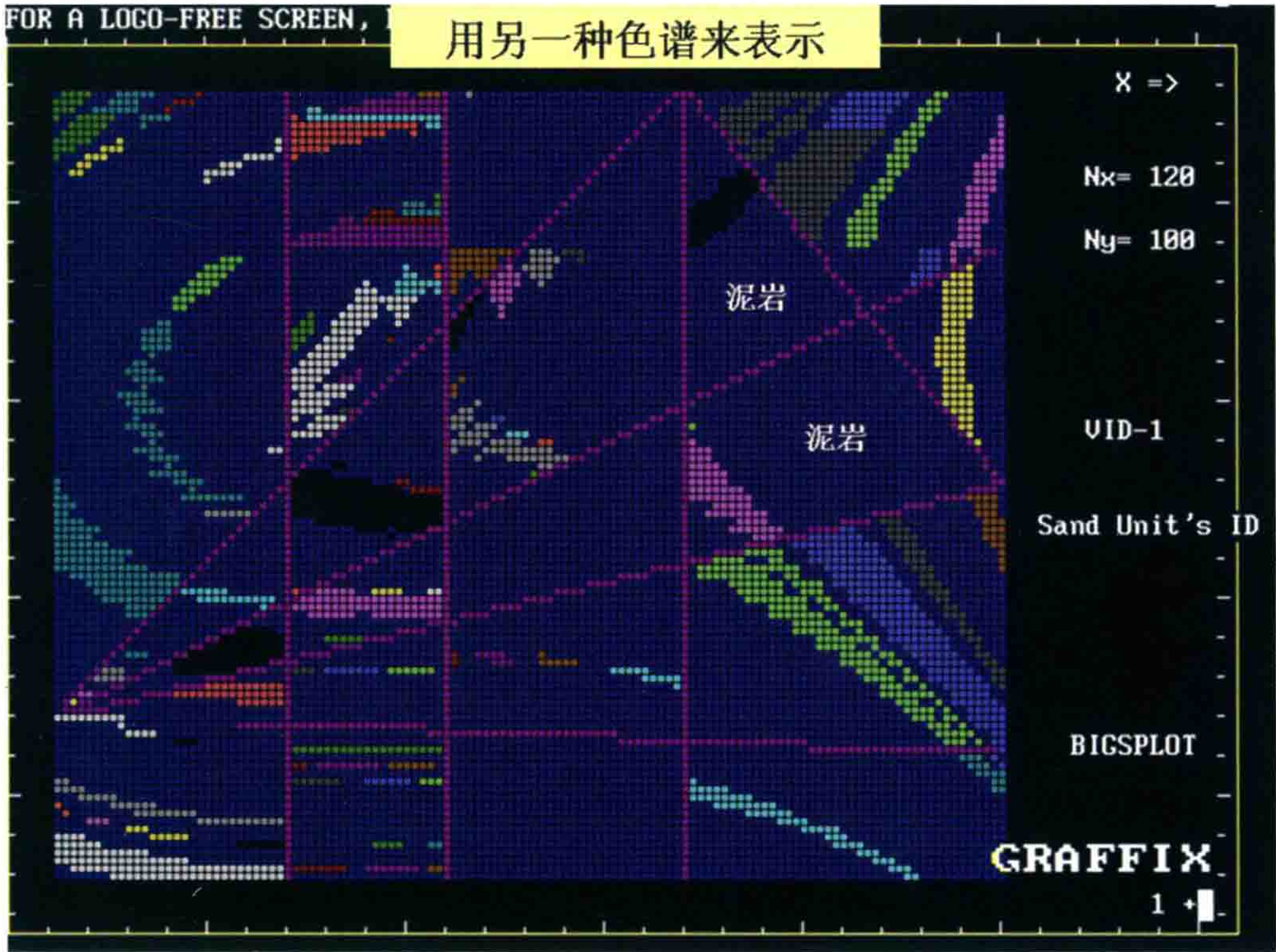


图 17　编号合并过程说明图示 3



图 18　编号合并过程说明图示 4

（二）复杂断块油田试验结果

7 条断层，20 个断块，构造形态如图 19 所示，试验结果如图 20～图 24 所示，右侧红圈内数字为切片编号。

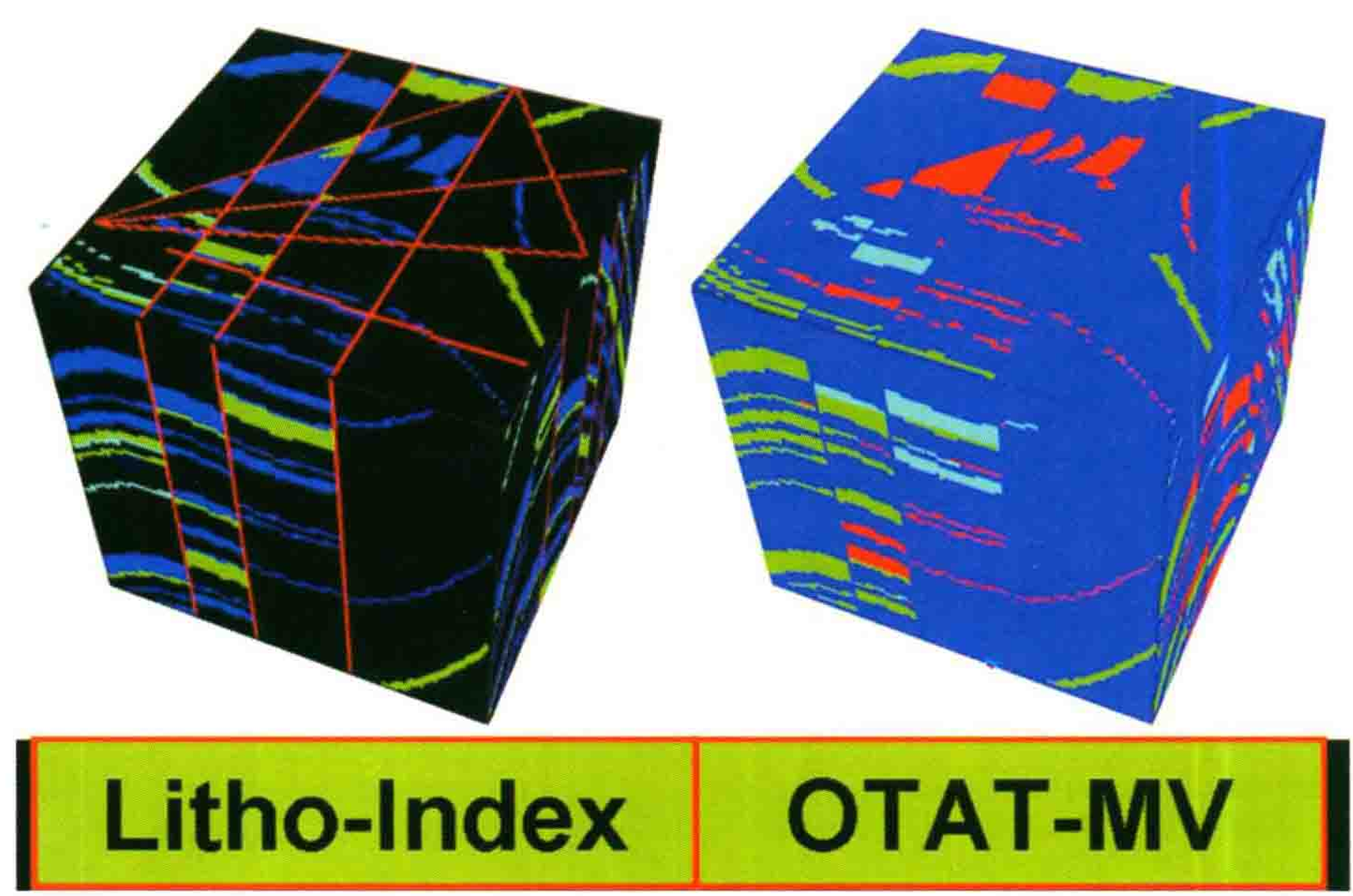


图 19　模型测试 2 的构造形态

图 20～图 22 显示了此模型的切片号 37～42 的 6 个相连的切片的 TRAP-3D 的分析结果。图左边是切片的岩性指数图。红色线是断层，绿蓝色代表砂岩与粉砂岩，黑色代表泥岩。右边是圈闭评价图。红色是圈闭良好的部位，是最可能含油的地方；天蓝色评价较低；绿色评价最低，相当于含水的地方；蓝色部位

是泥岩，不作评价。

图 20 的右边，切片 37 及 38 里都见到有不少红色区。注意其最上方一块红色区与含有边水的两片绿色区在断层两侧砂岩尚未见面。而到图 21，切片 39 中，小圆圈的地方，断层两侧有一颗砂岩见了面，于是原来切片 38 里的红色粉砂岩降低了圈闭评价，到 39 切片里变为绿色。再到切片 40 里，小圆圈又显示了评价低的绿色区把绿色又使断层右边的砂岩降低了评价，变成绿色。

图 22 里绘出了这些断块里由于砂岩见面造成的油气漏失的形象化的评价降低的转移路线，如箭头方向所示。

这次试验中，我们使用 SEAL＝1 参数，即只要断层两侧有一颗砂子见面，就使油气漏光。这是为了严格测试我们程序的准确性。在以后正式投产时，我们将使用 SEAL＝5～20。

在程序运行完所有的切片评价后，我们再把这个立方体数据抽成 x 及 y 方向的纵剖面。图 23 就是 y 方向的垂直纵剖面。可以看到一个被断层分隔的背斜，左边的评价剖面里可以看到红色的每个"含油区"都有由红变绿的水平的"油水分界线"。我想，任何人也不可能想象这条剖面里的油水分界线会是这样分布的。然而，只有 TRAP-3D 给出了准确的答案。图 24 是 x 方向的垂直纵剖面，其中油水关系也给人以很神奇的感觉。

由于数据的限制，我们模型中设计的断层都是垂直断层，但是我们通过测试证明：TRAP-3D 程序可以适应地下任何产状的断裂系统。

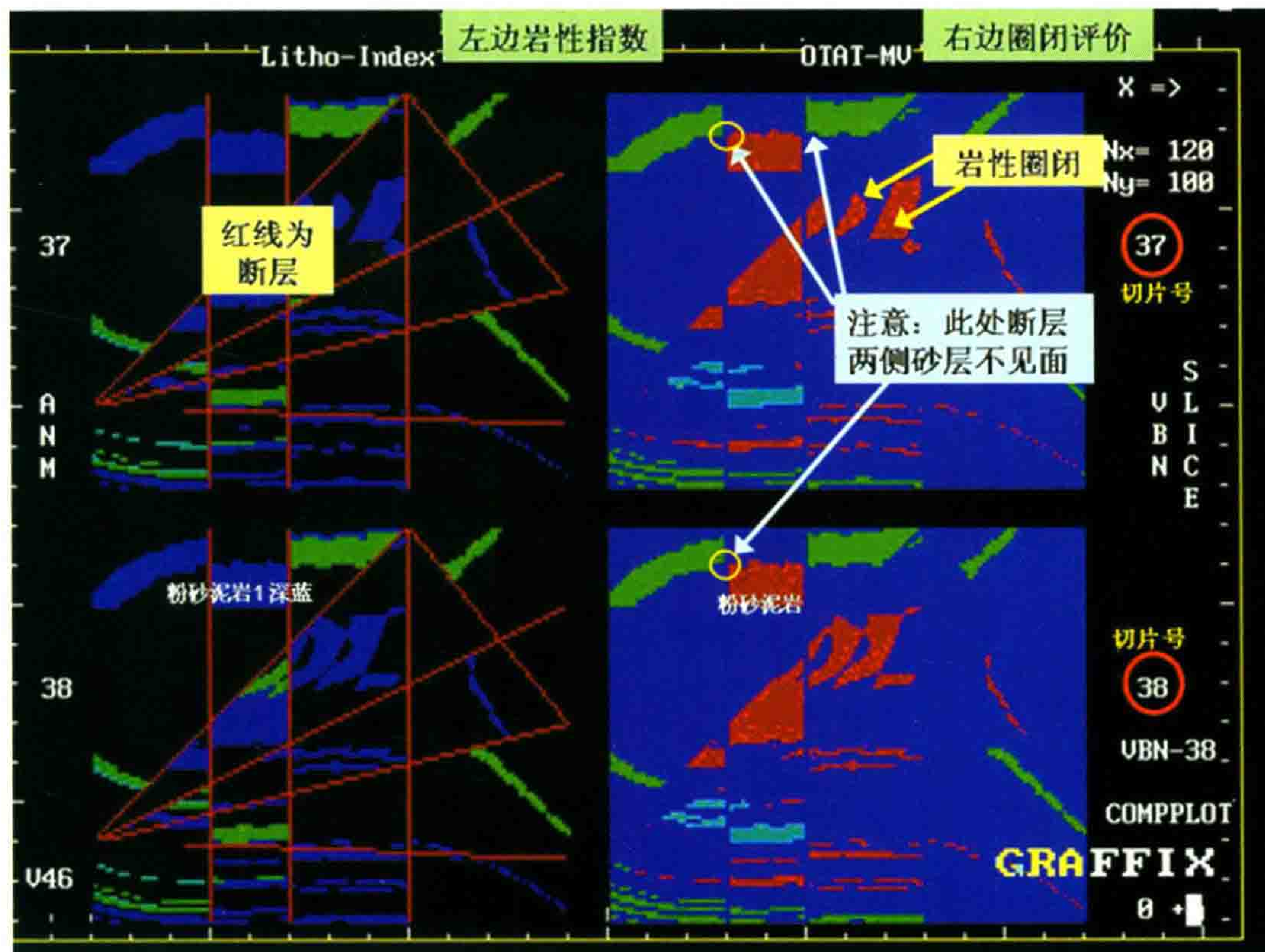


图 20 模型 2 试验结果(切片 37、38)

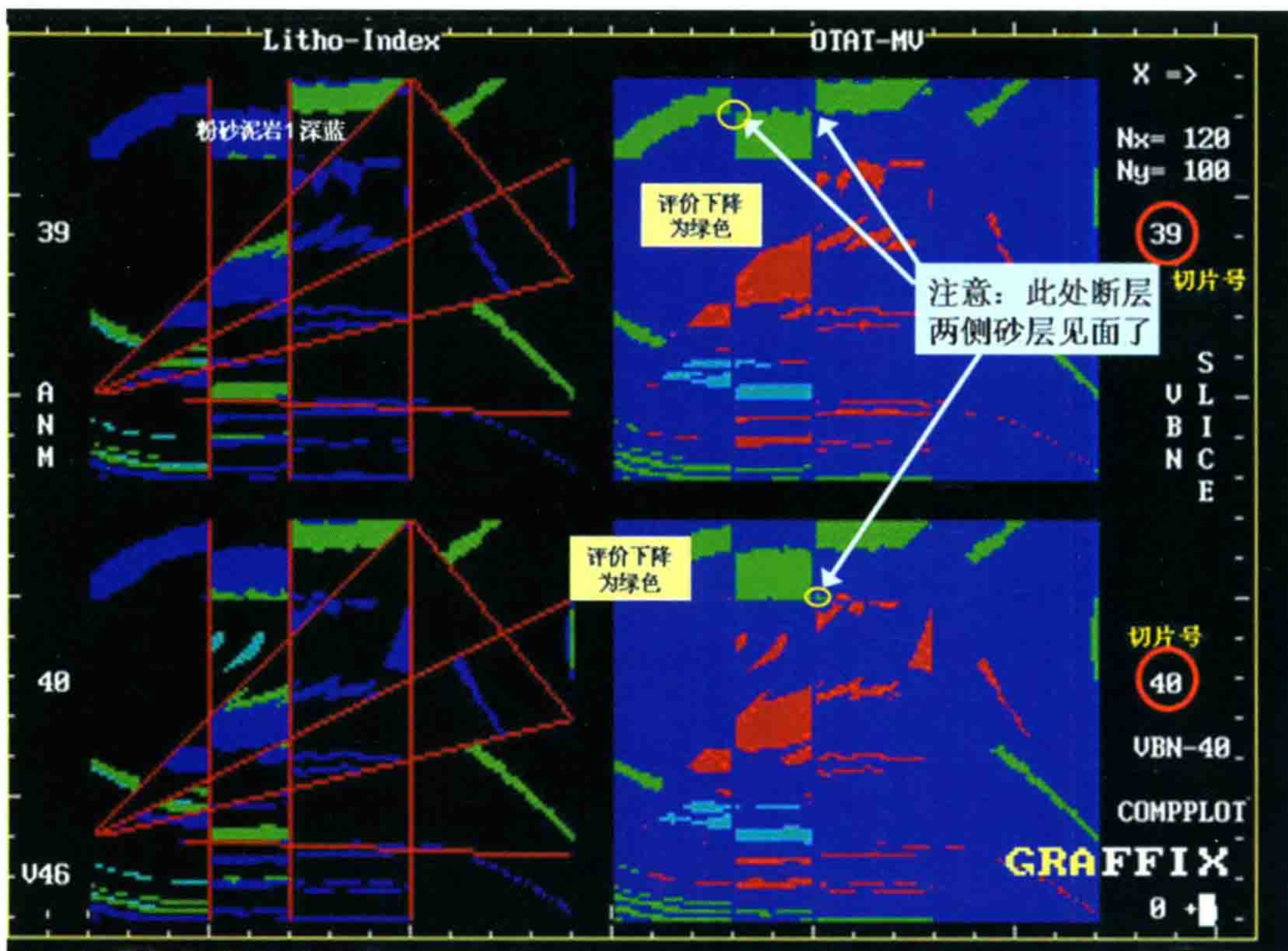


图 21　模型 2 试验结果(切片 39、40)

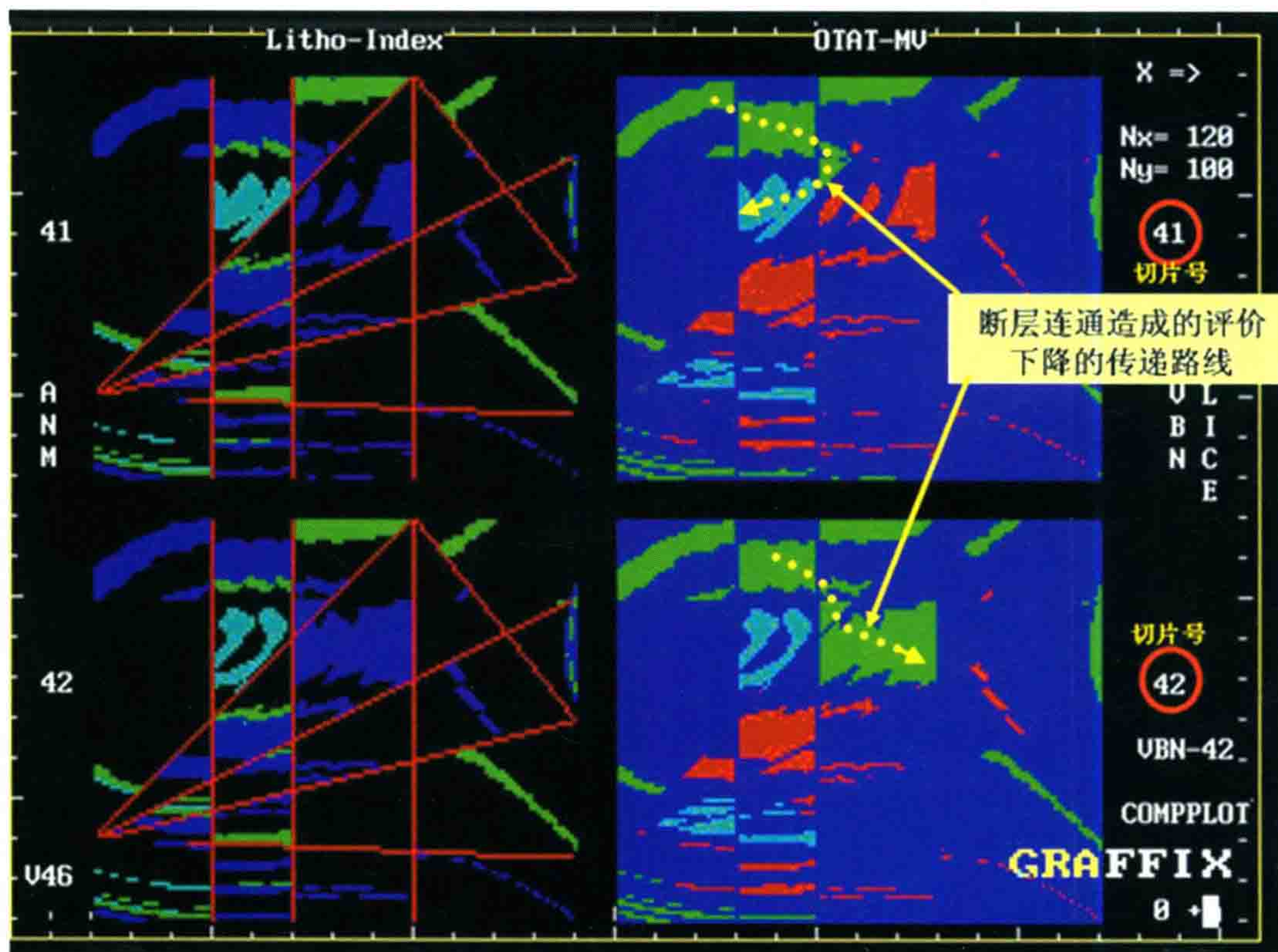


图 22　模型 2 试验结果(切片 41、42)

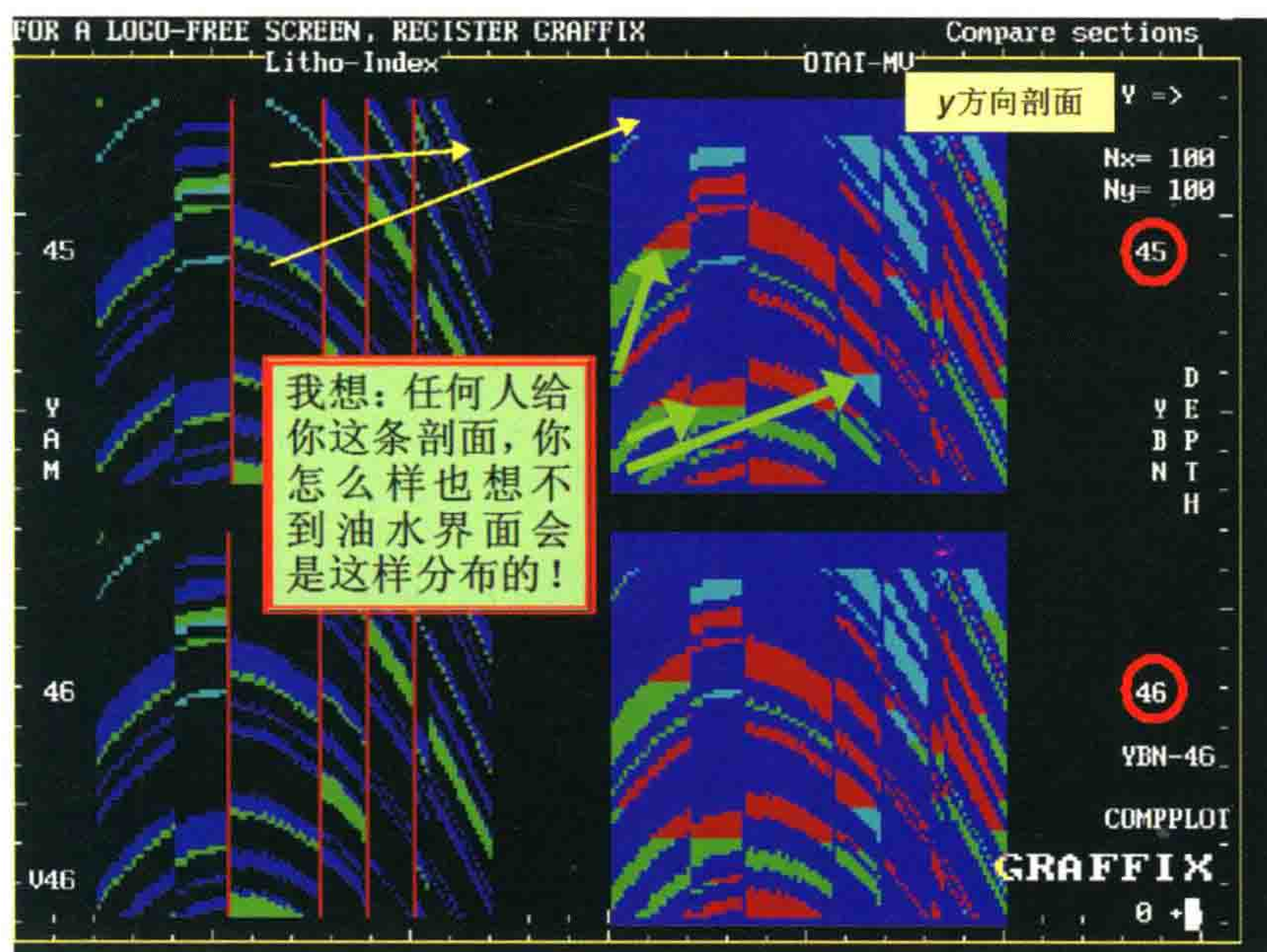


图 23 模型 2 试验结果(切片 45、46)

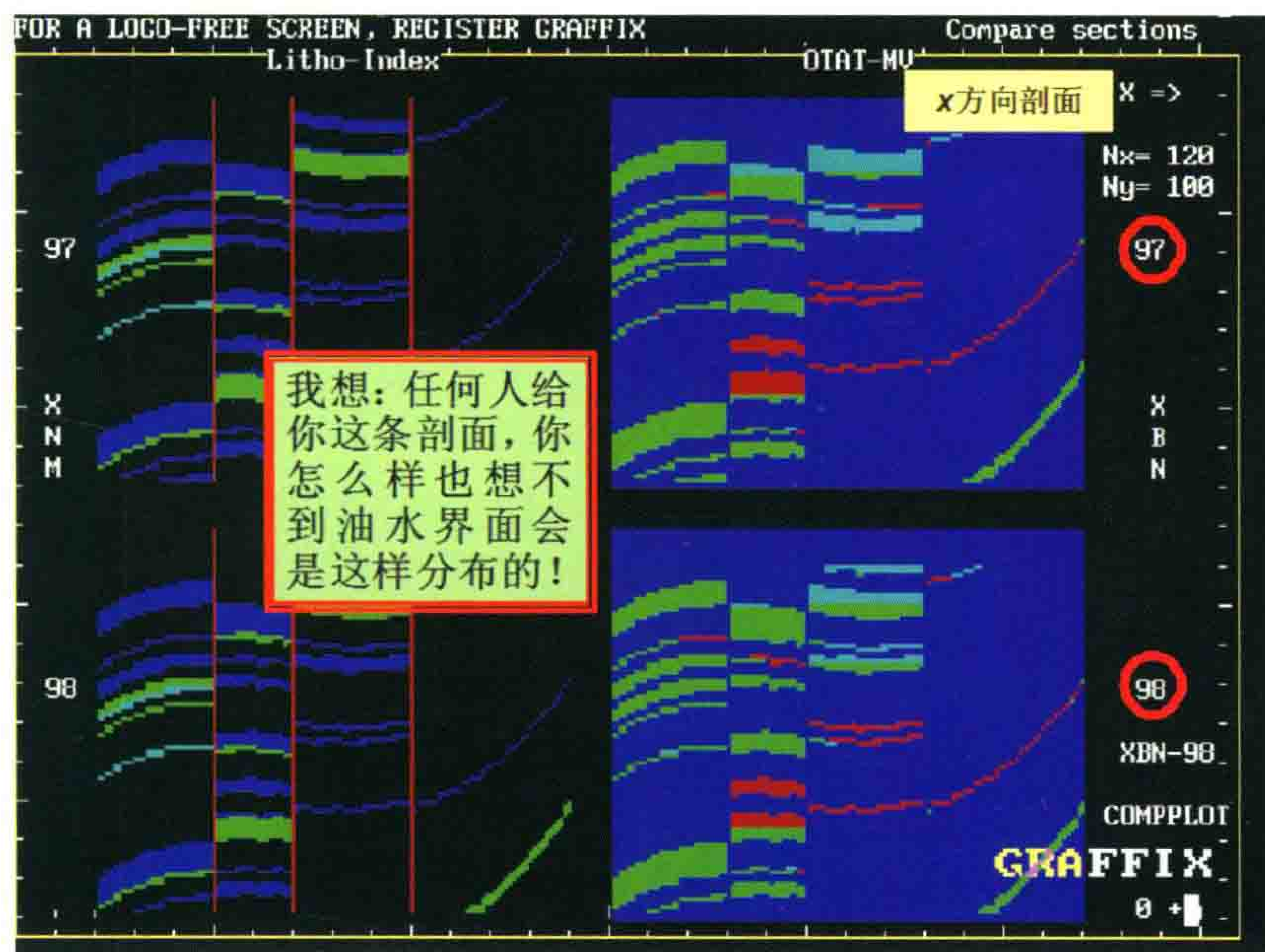


图 24 模型 2 试验结果(切片 97、98)

(四) 总圈闭量计算方法

小立方元(CUBIXEL)的大小以 10 m×10 m×1 m 为好，100 km² 的 bin(面元)是 1000×1000 样点。

从总圈闭量计算预计储量的办法是：

总圈闭量＝SUM(MV＊INDEX)＊CUBIXEL＊平均孔隙度/(2＊800)*

---

* 此公式是相当于容积法求储量的公式。岩性指数 INDEX 代表空隙的大小，MV 可以理解为近似相当于含油饱和度。因为公式中采用了平均孔隙度，而砂岩的 Index 1、2、3 的平均值为 2，所以要除 2。而 800 是圈闭评价 MV 的最高评分(我们采用 8 进位制，800 就是满分 100 分的意思)，所以要除以 800 才大致相当于含油饱和度。注意，此公式计算的是总圈闭量，不是含油气的储量。只有在油源十分充裕的条件下，它才代表可以装油的最大容积(地质储量)。

（五）圈闭量的柱状表达图

圈闭量的柱状表达图如图 25 所示。

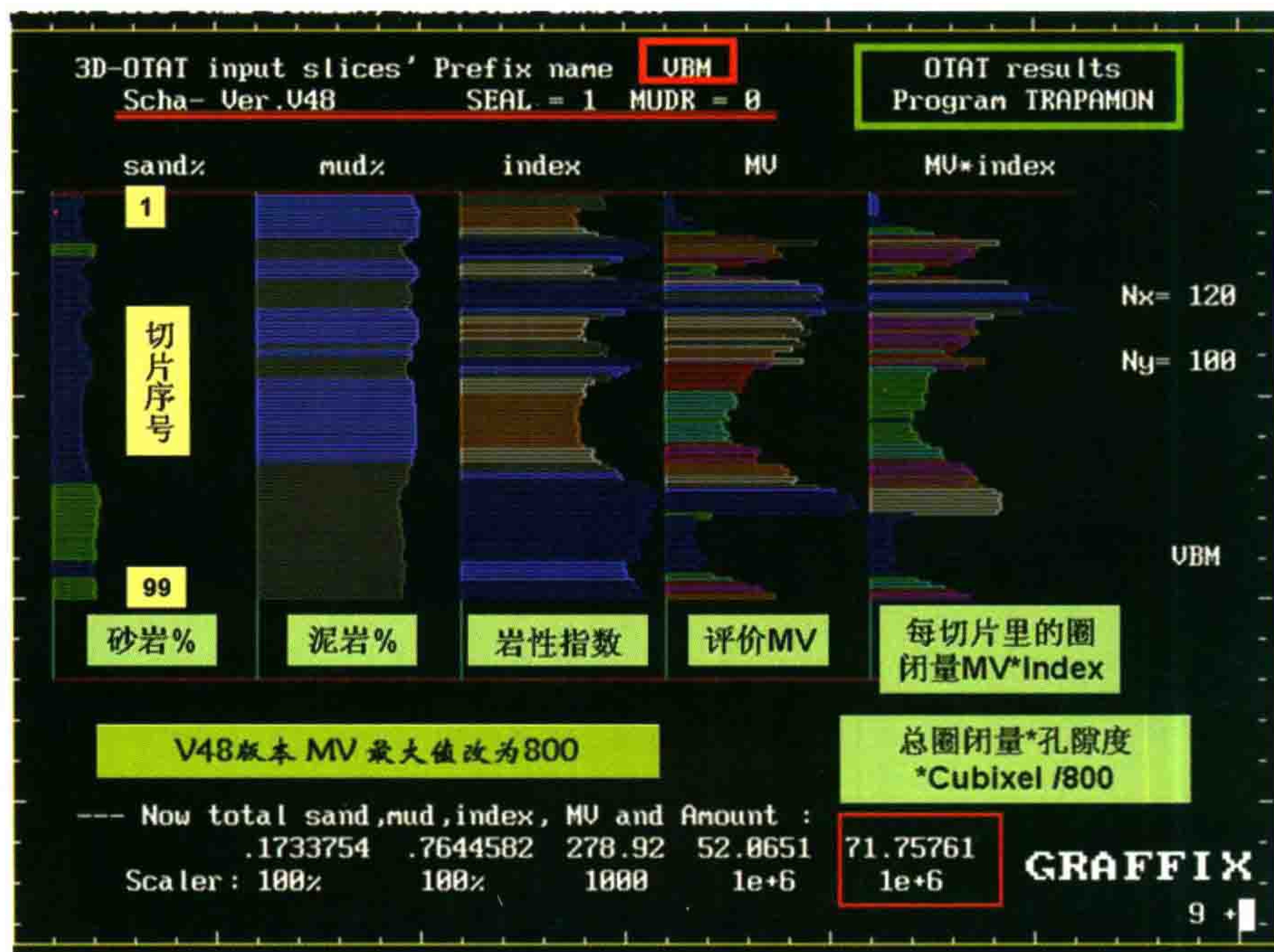


图 25　圈闭量的柱状表达图

（六）甜点图

甜点图如图 26 所示。



图 26　甜点图

六、模型测试(3)

模型测试(3)如图 27～图 29 所示。

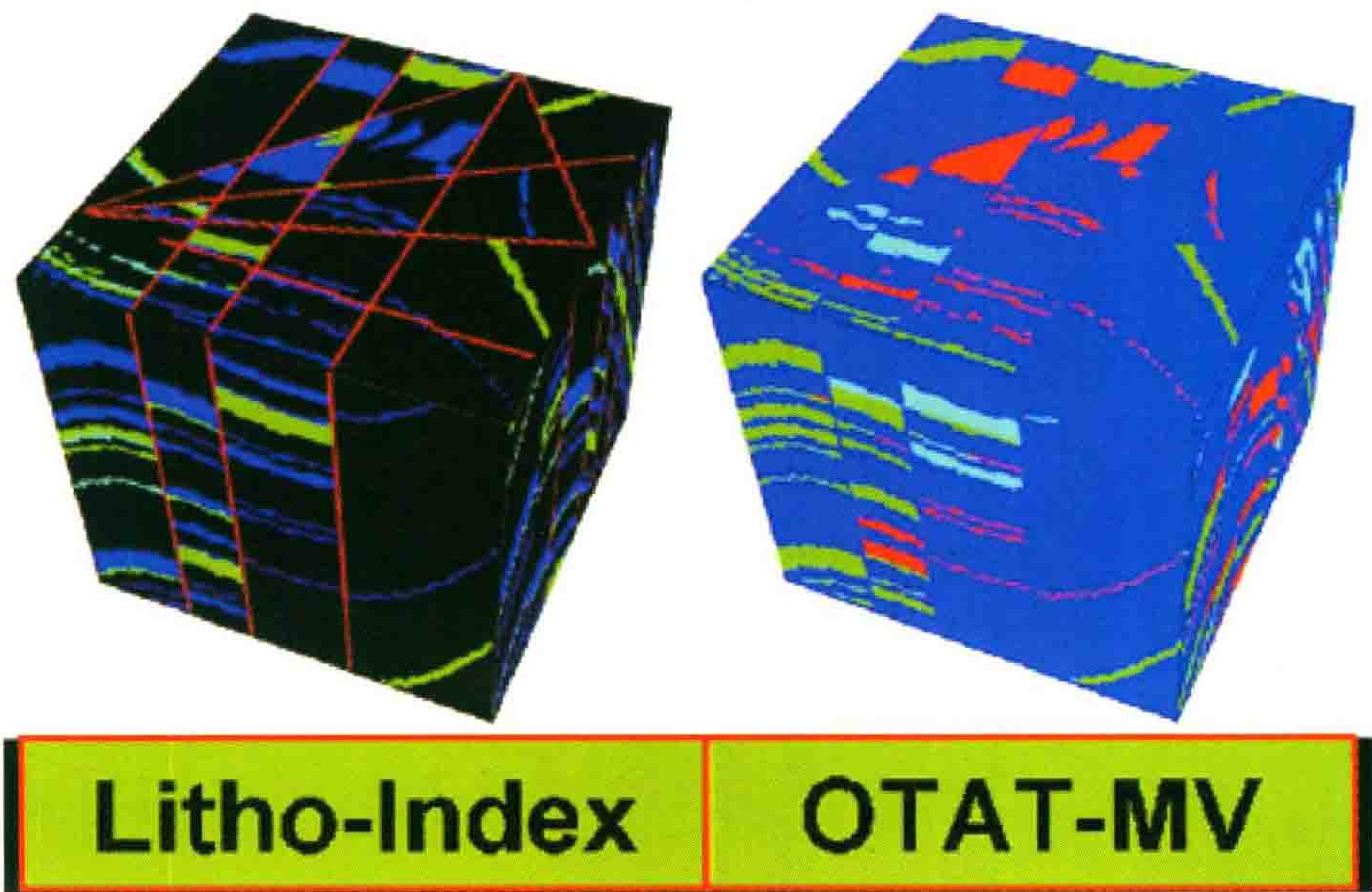


图 27　模型测试(3)构造形态

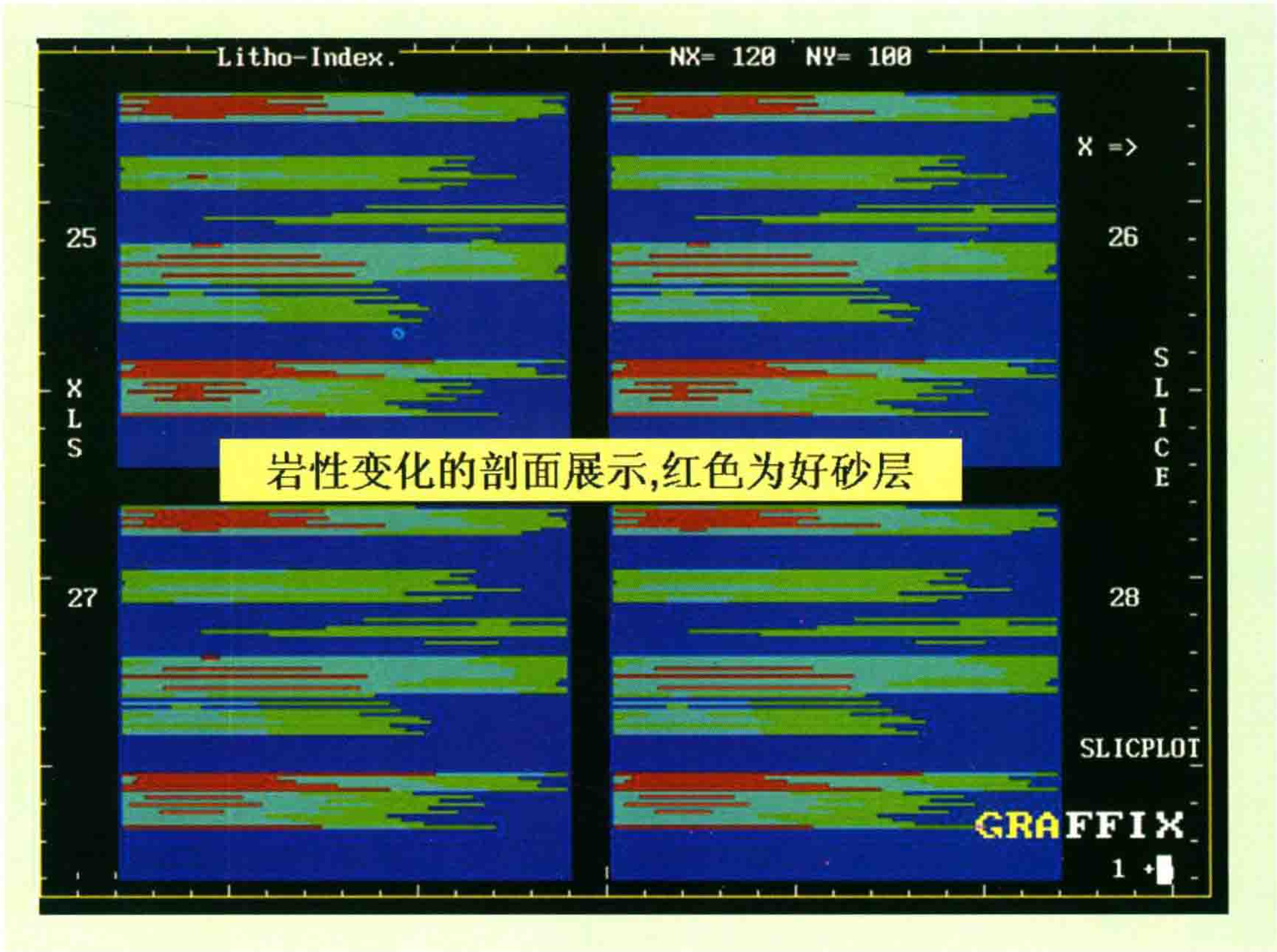


图 28　岩性变化的剖面显示

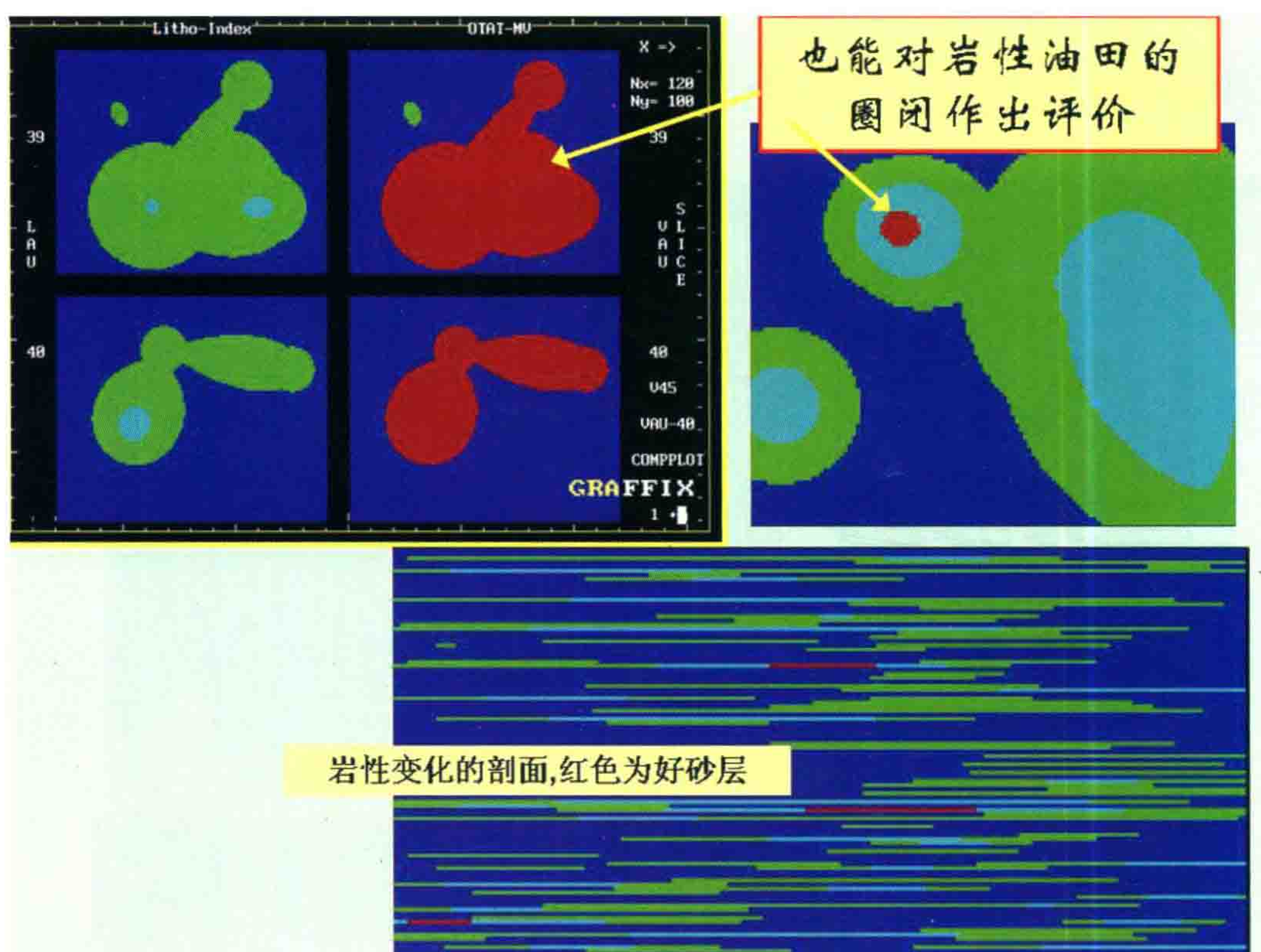


图 29 对岩性油田圈闭评价图

处理流程图如图 30 所示。

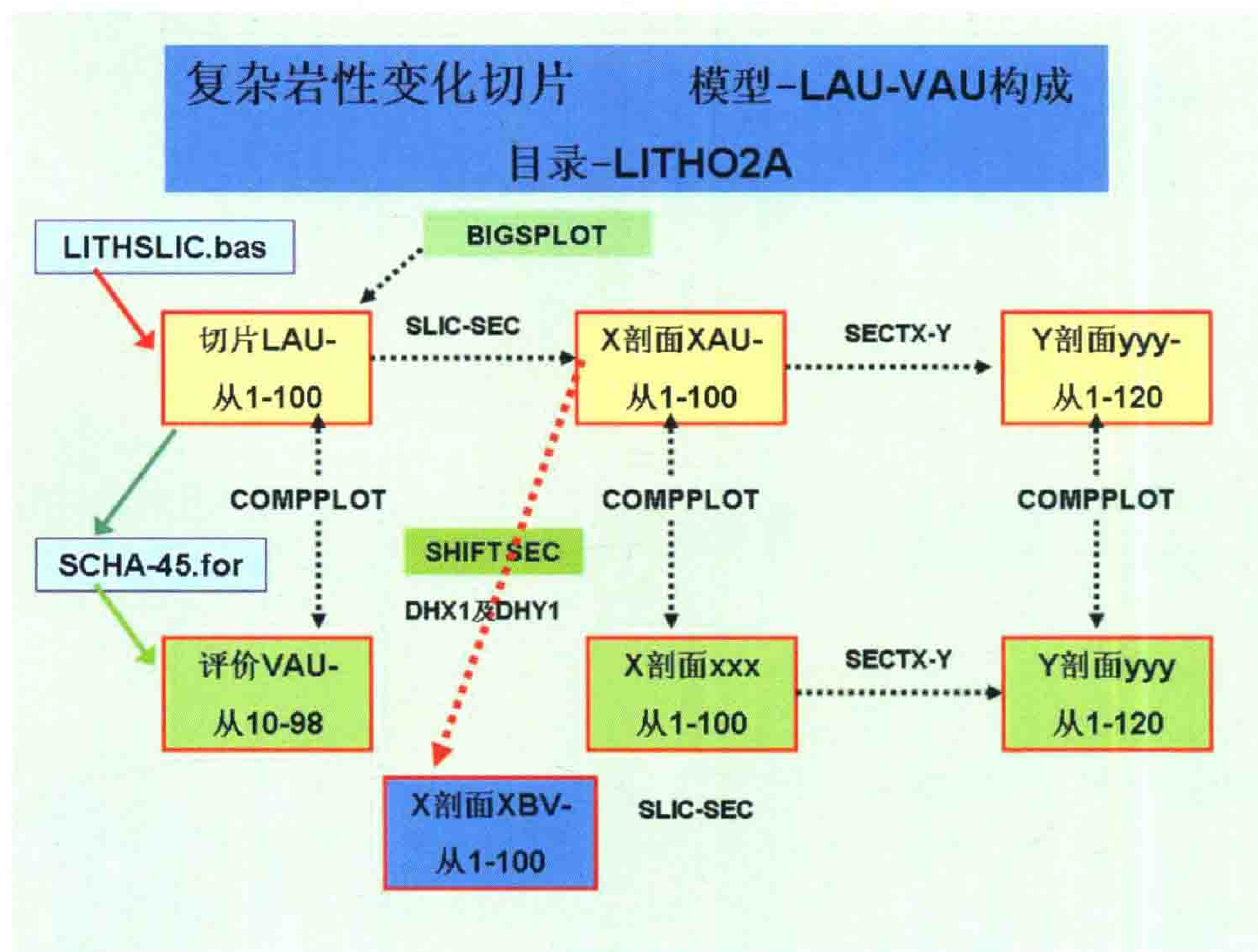


图 30 处理流程图

七、模型测试(4)

(一)在岩性变化模型加上构造起伏

2011年9月13日,岩性切片LAU-,其剖面XAU-用SHIFTSEC加构造文件DHX4及DHY4,X方向及Y方向的升降控制数据。

岩性变化的数据体经过上下移动,变为构造加复杂岩性ZAU-剖面。

再转换为新的切片RAU-,再用SLICPLOT进行显示。

(二)处理流程图

处理流程图如图31所示。

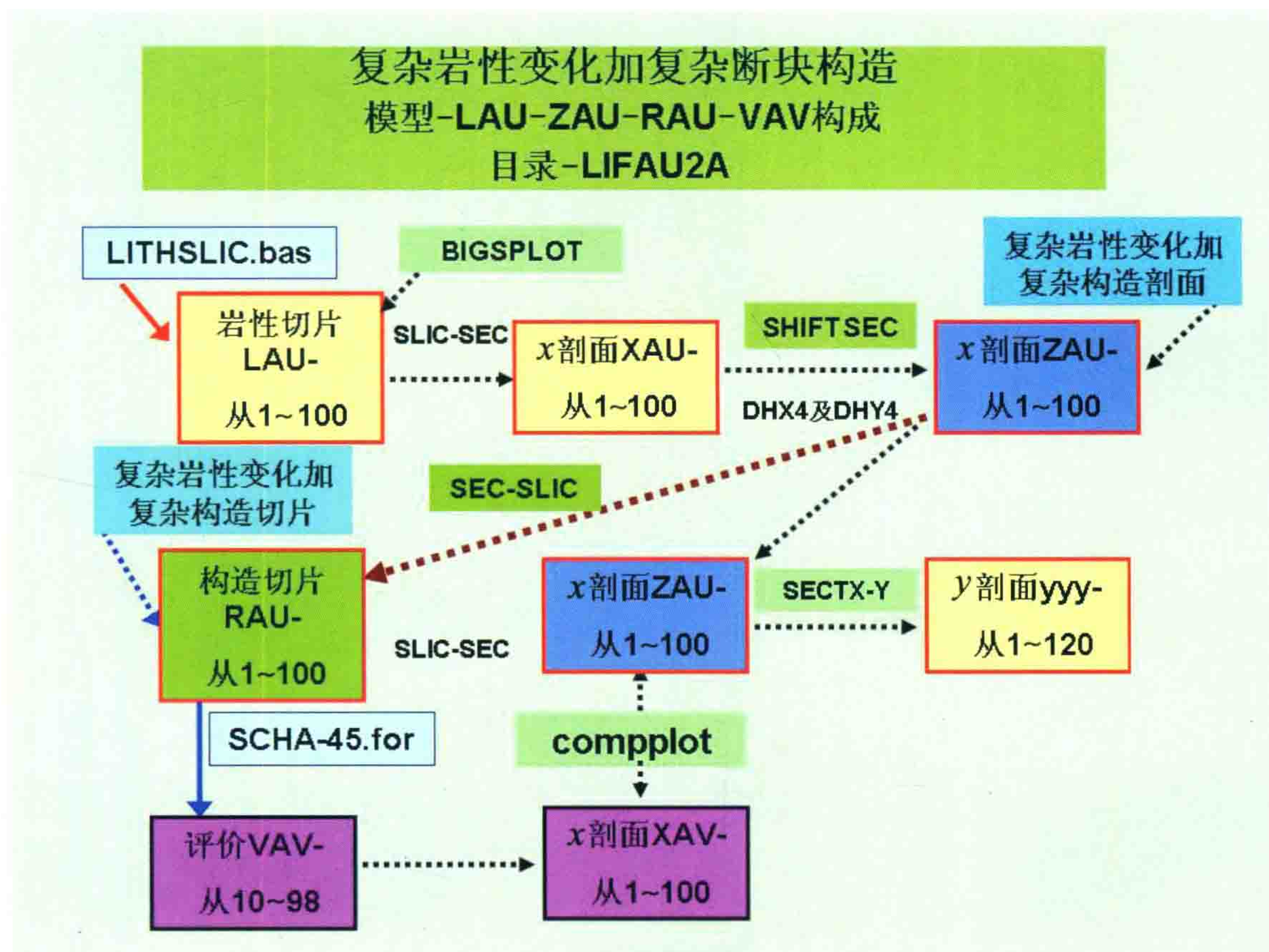


图31 处理流程图

(三)构造形态图

构造形态图为复杂岩性变化+断块构造的模型(图32、图33、图34)。

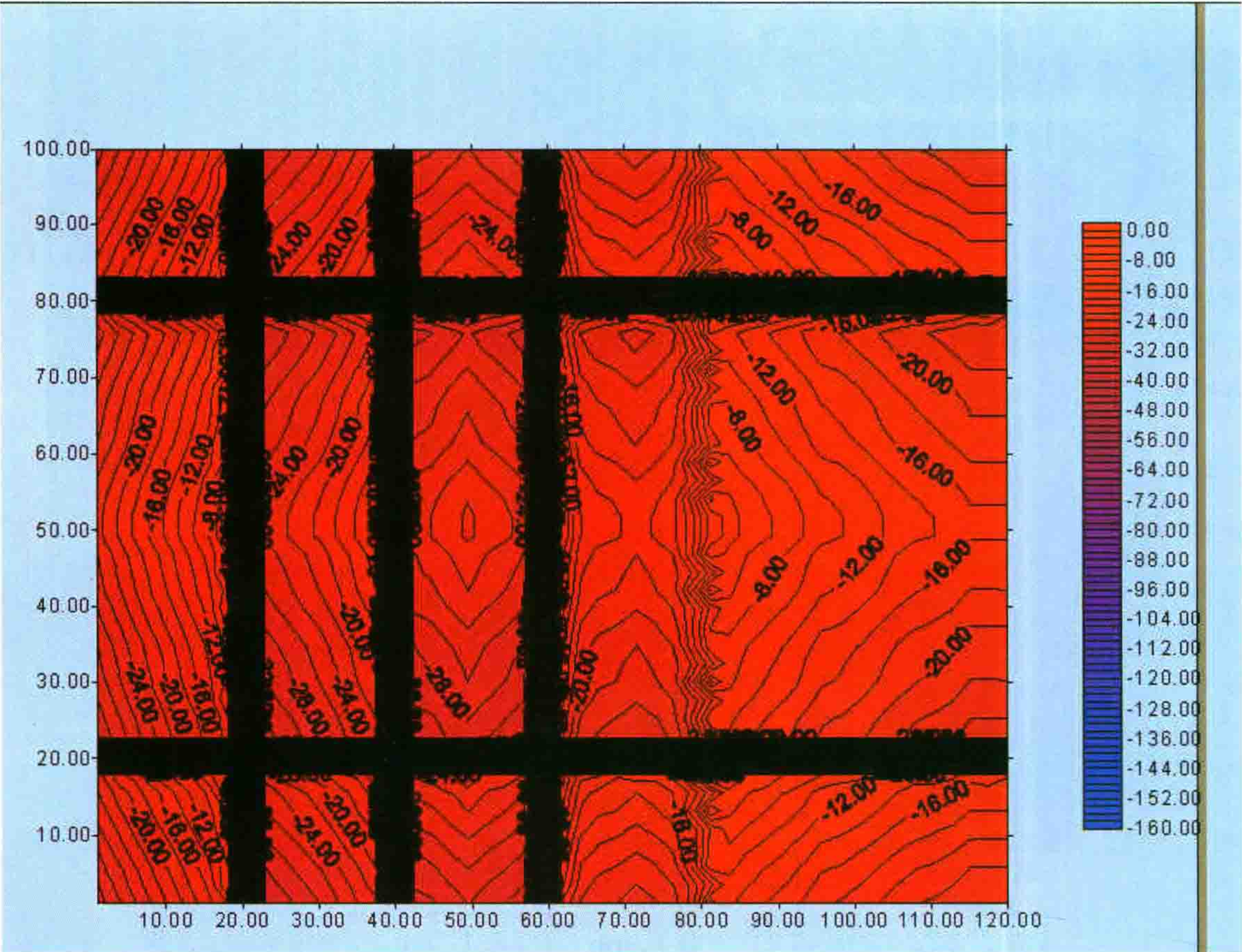


图 32　模型测试(4)复杂构造的顶面形态—平面等高线图

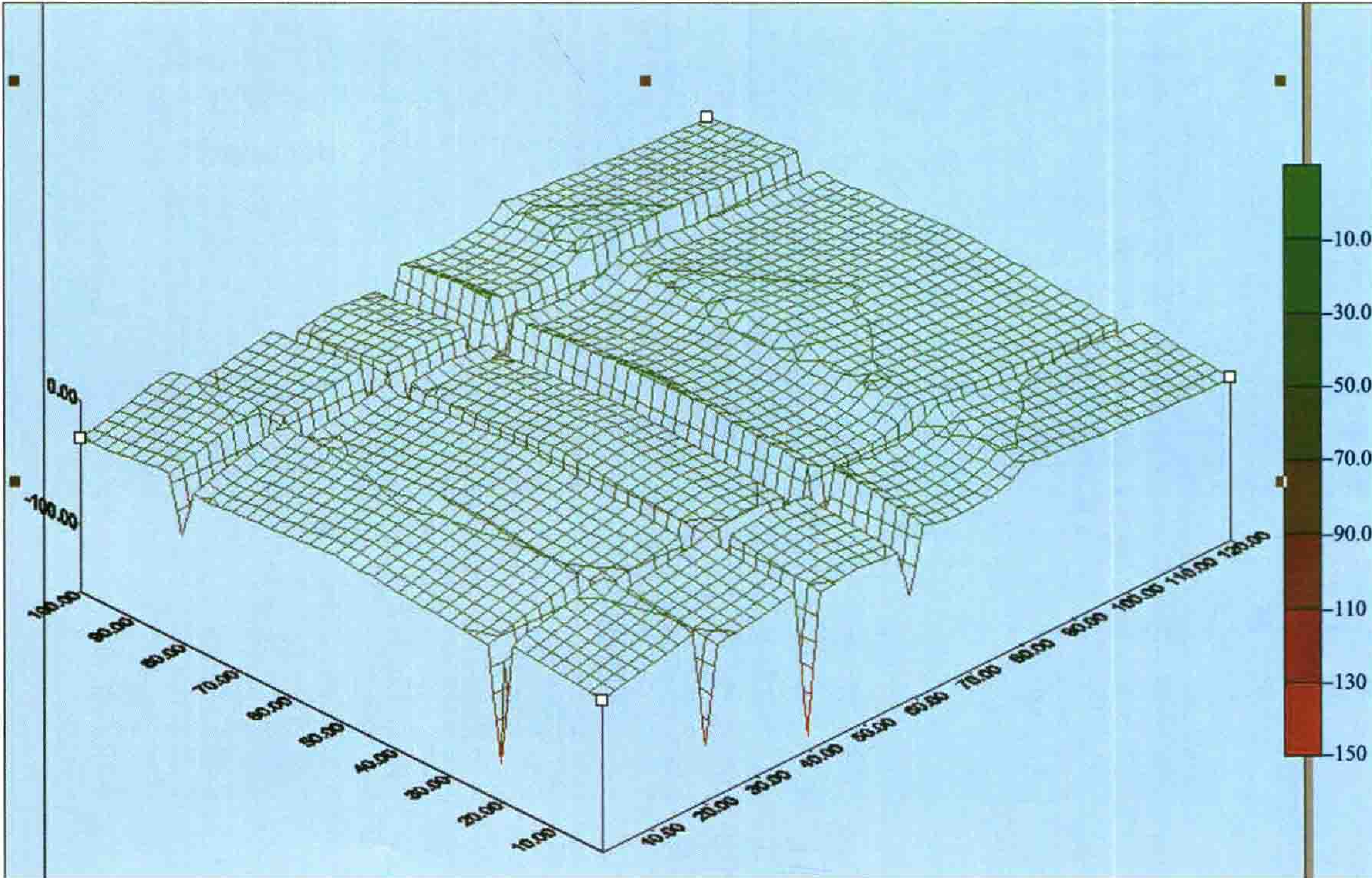


图 33　模型测试(4)复杂构造的顶面形态—等高线立体显示图

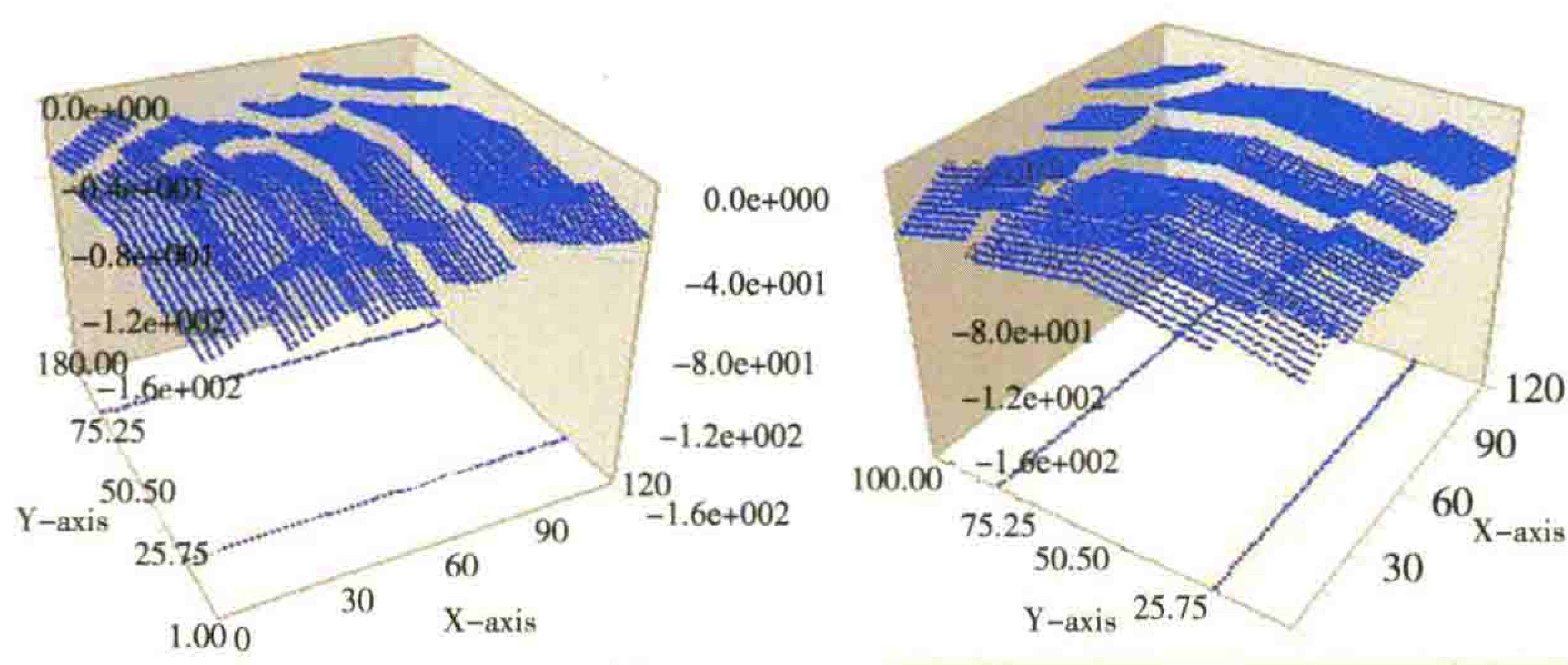


图 34　复杂构造的顶面形态—只显示顶面形态

（四）剖面图选登

剖面图选登见图 35～图 37。

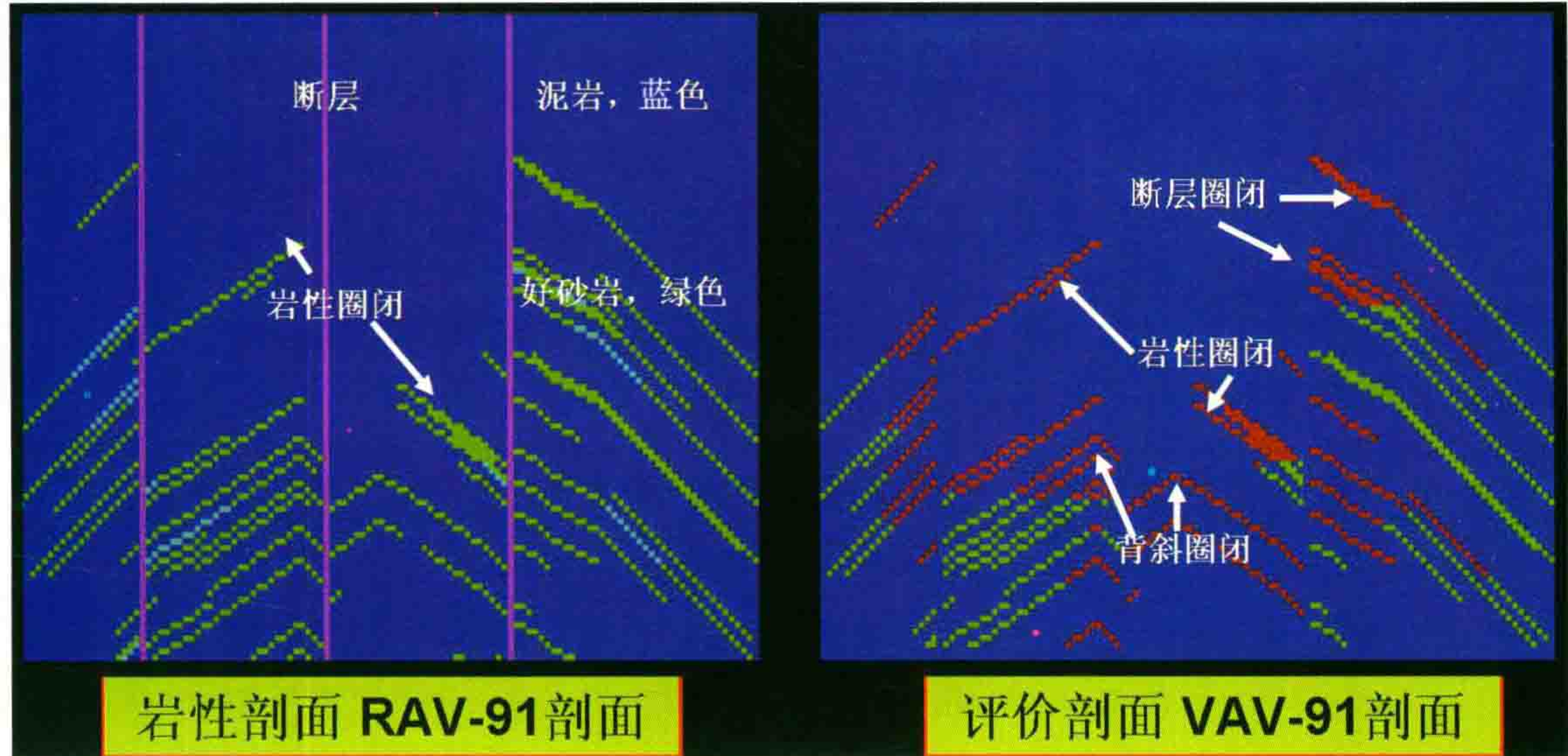


图 35　复杂岩性加复杂构造模型剖面 91

图 35 所示为 x 方向的 91 剖面，红色圈闭评价最高，绿色为水侵砂岩。



图 36　复杂岩性加复杂构造模型剖面 77

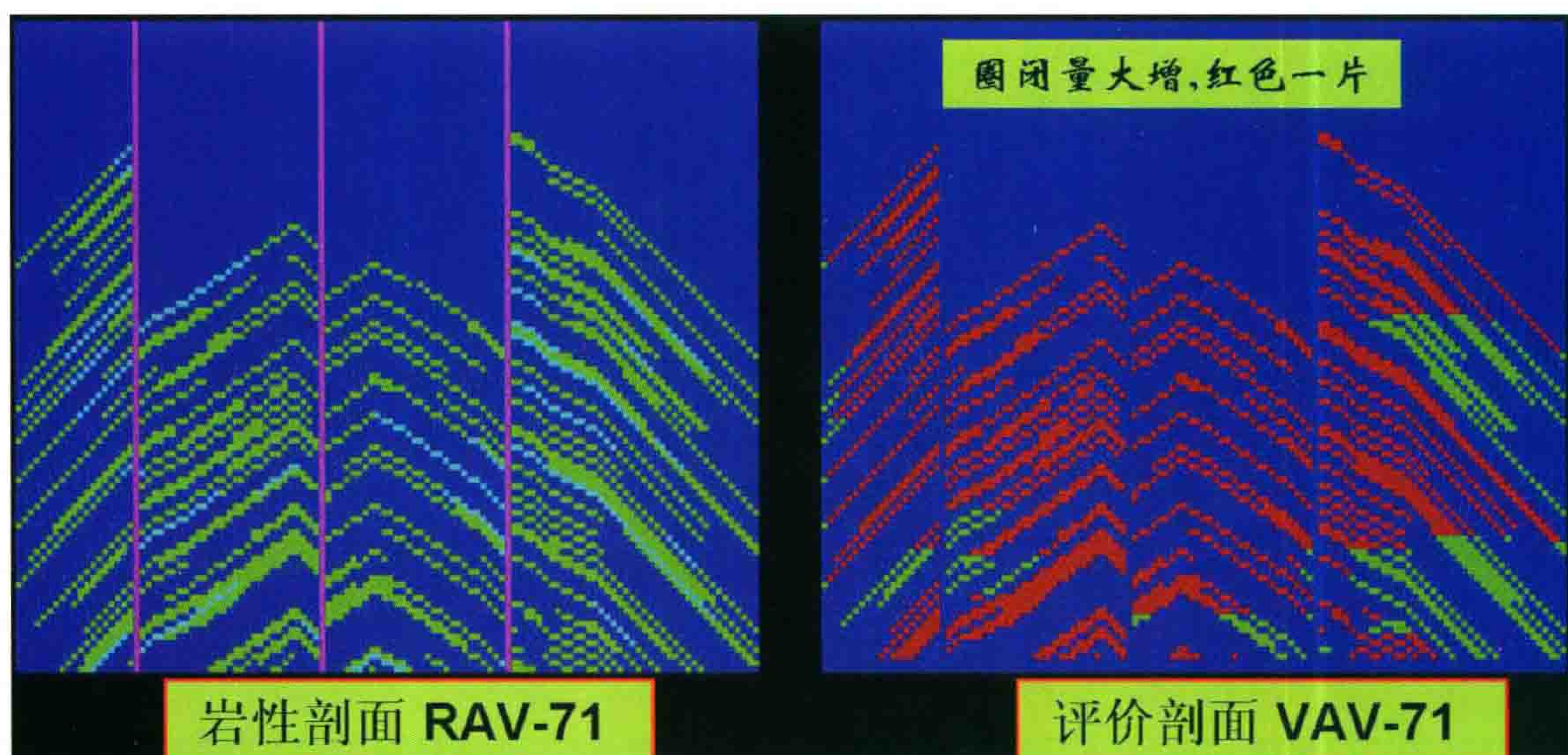


图 37 复杂岩性加复杂构造模型剖面 71

图 35 所示为编号 77 剖面，图 37 所示为编号 71 剖面，均显示出圈闭量大增。表明剖面上部以岩性圈闭及断层圈闭为主。中部出现构造圈闭，而且圈闭量逐渐增多。

（五）切片显示图

切片显示图如图 38～图 42 所示。

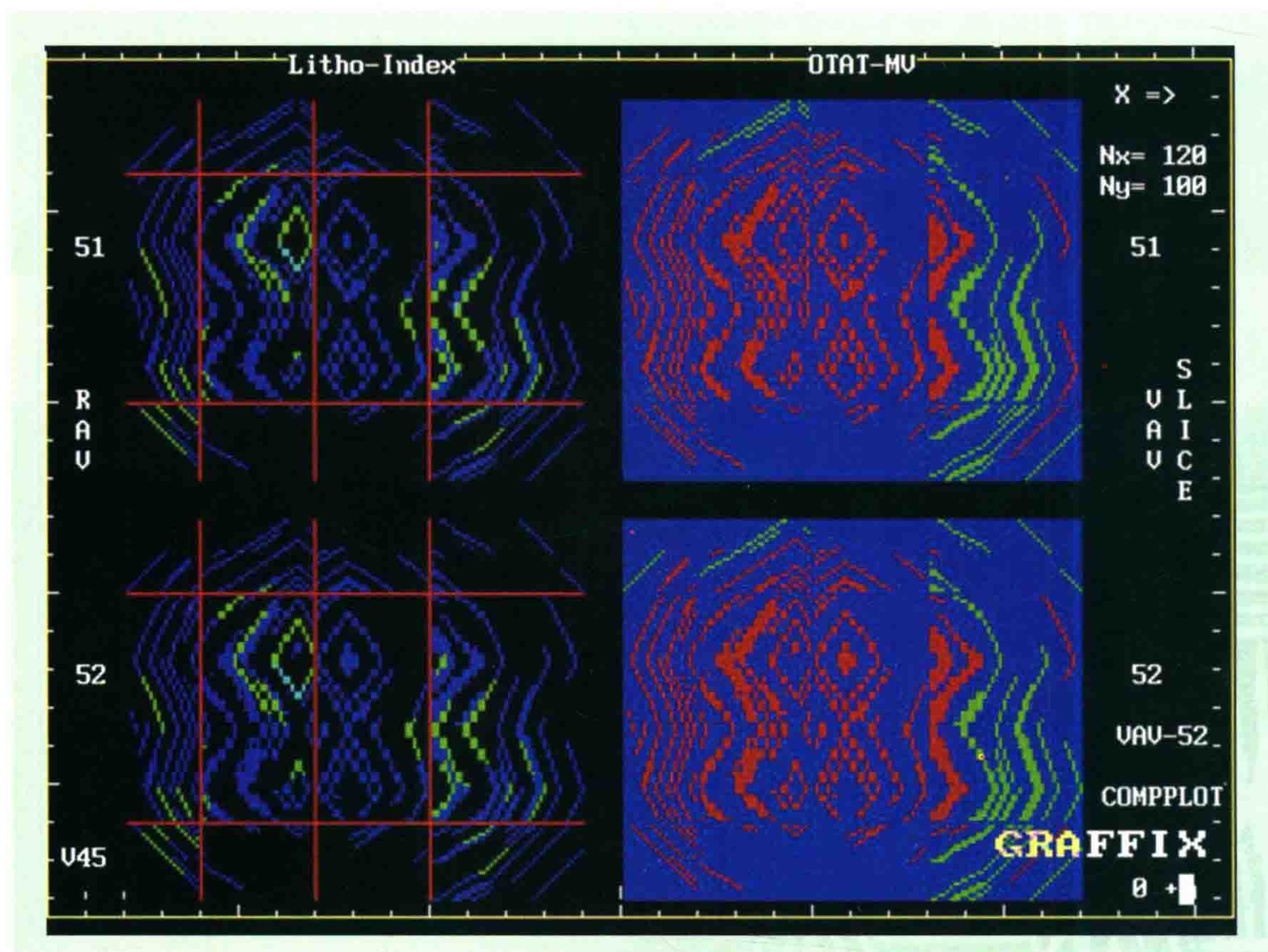


图 38 编号 51 与编号 52 切片显示

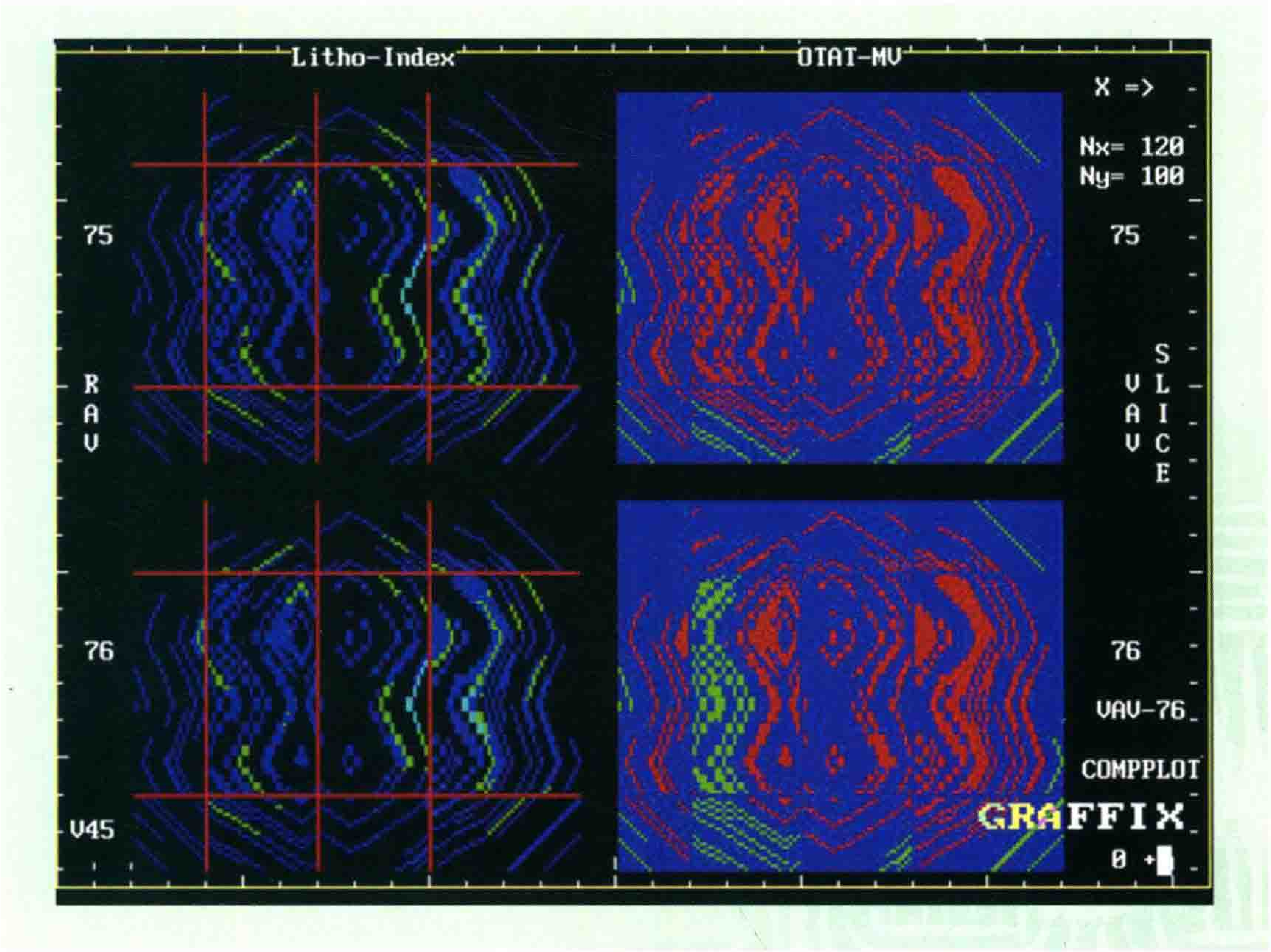


图 39 编号 75 与编号 76 切片显示

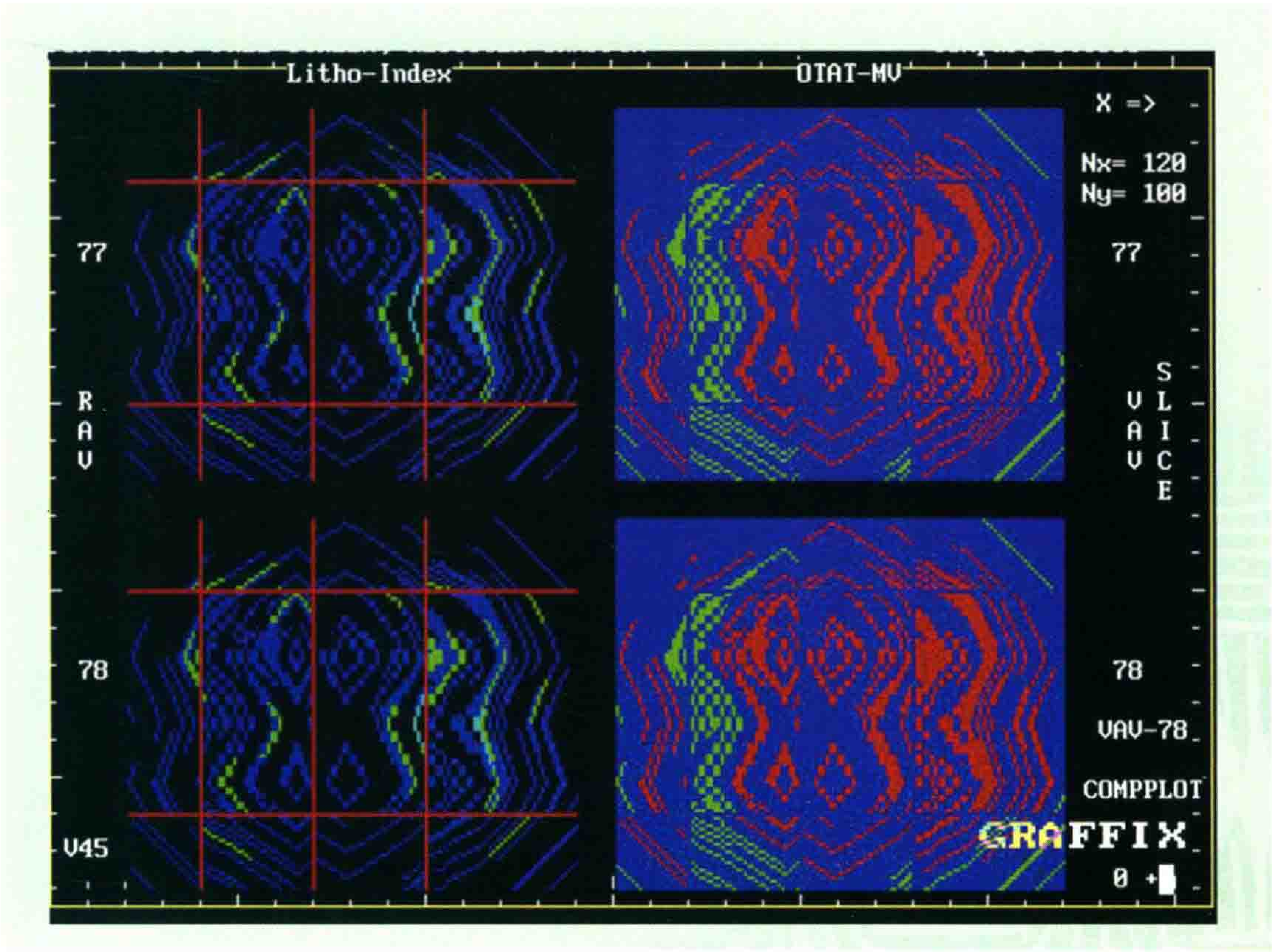


图 40 编号 77 与编号 78 切片显示

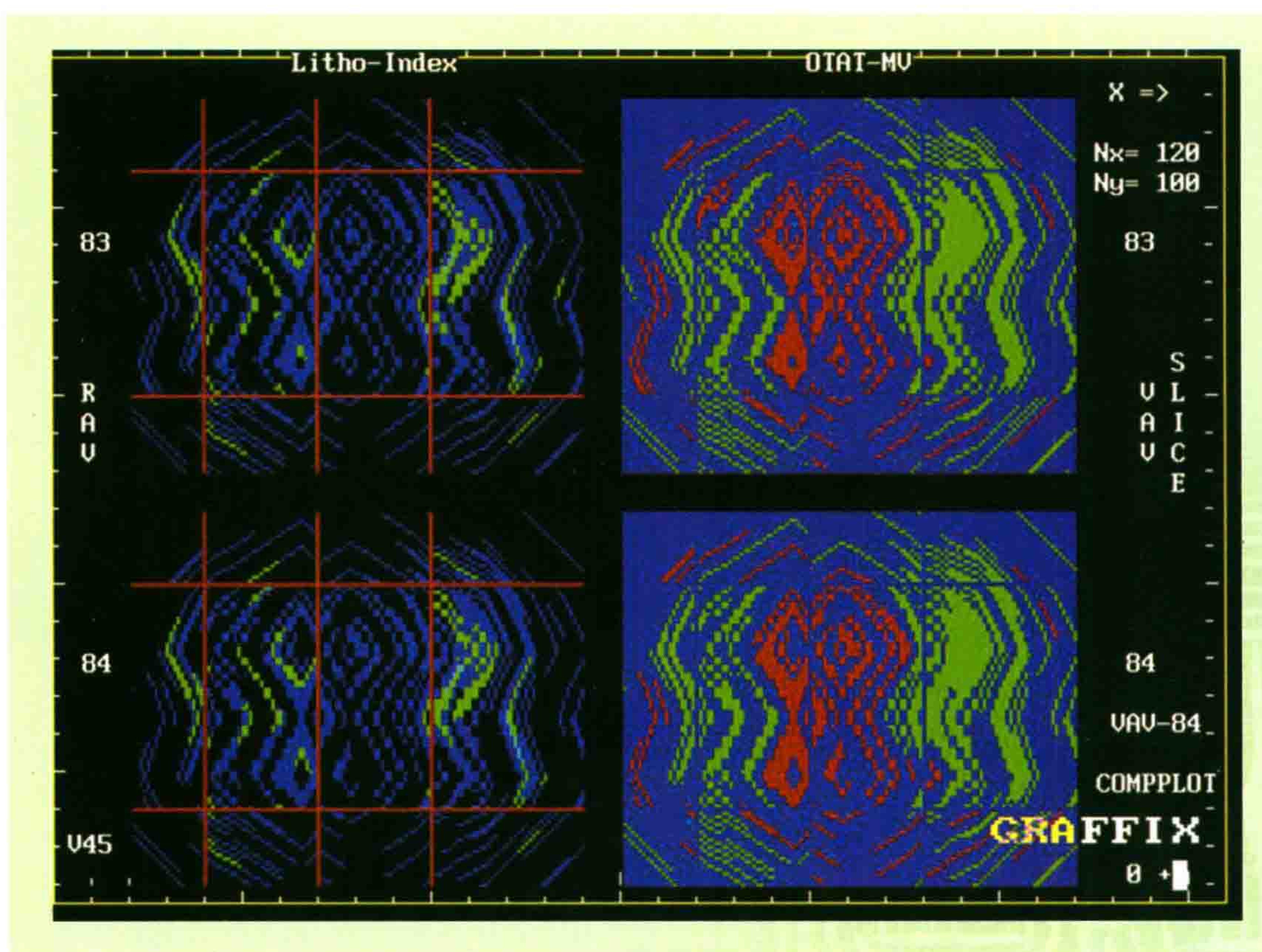


图 41 编号 83 与编号 84 切片显示

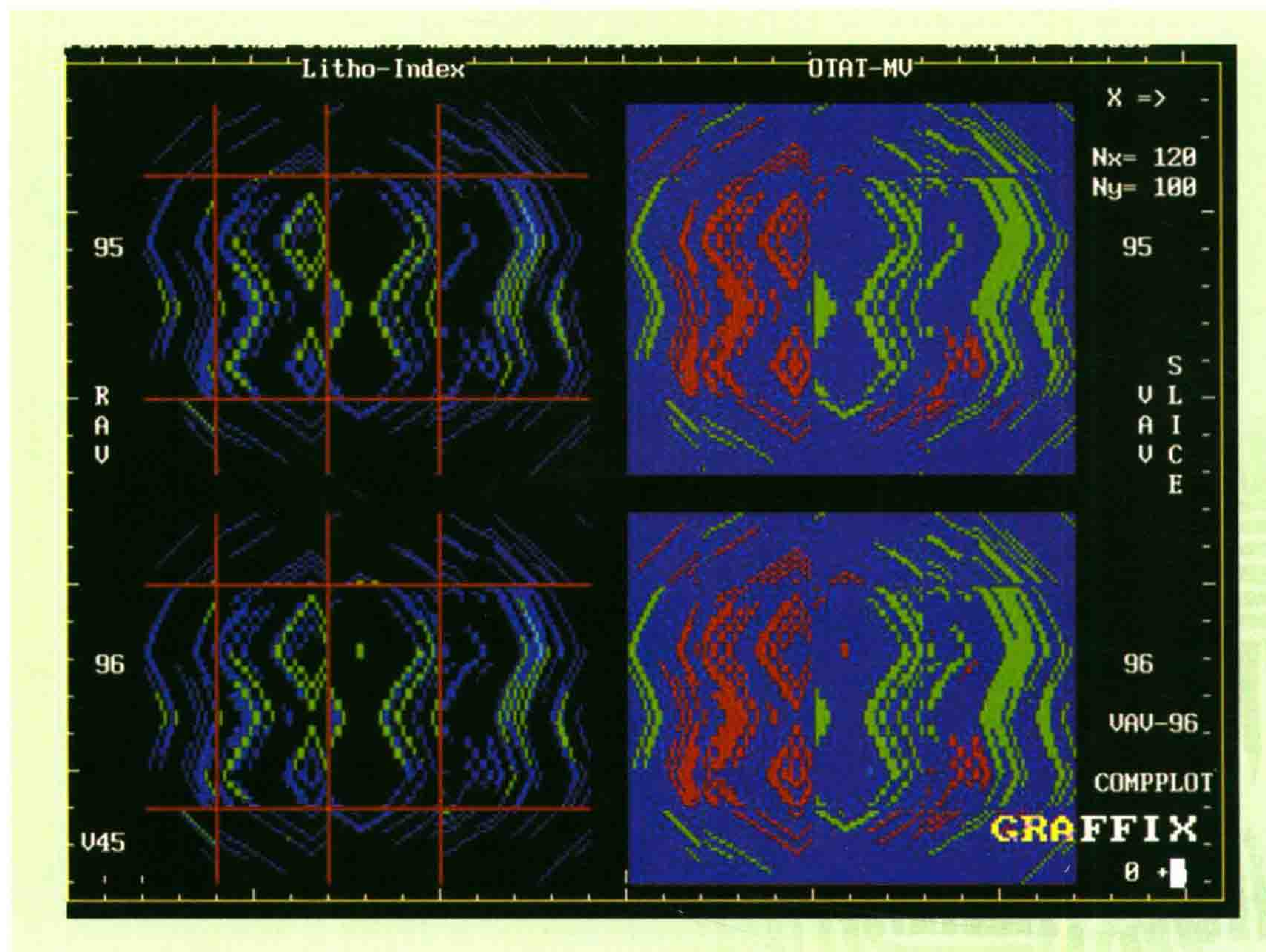


图 42 编号 95 与编号 96 切片显示

（六）圈闭量的柱状表达图

圈闭量的柱状表达图，如图43、图44所示。

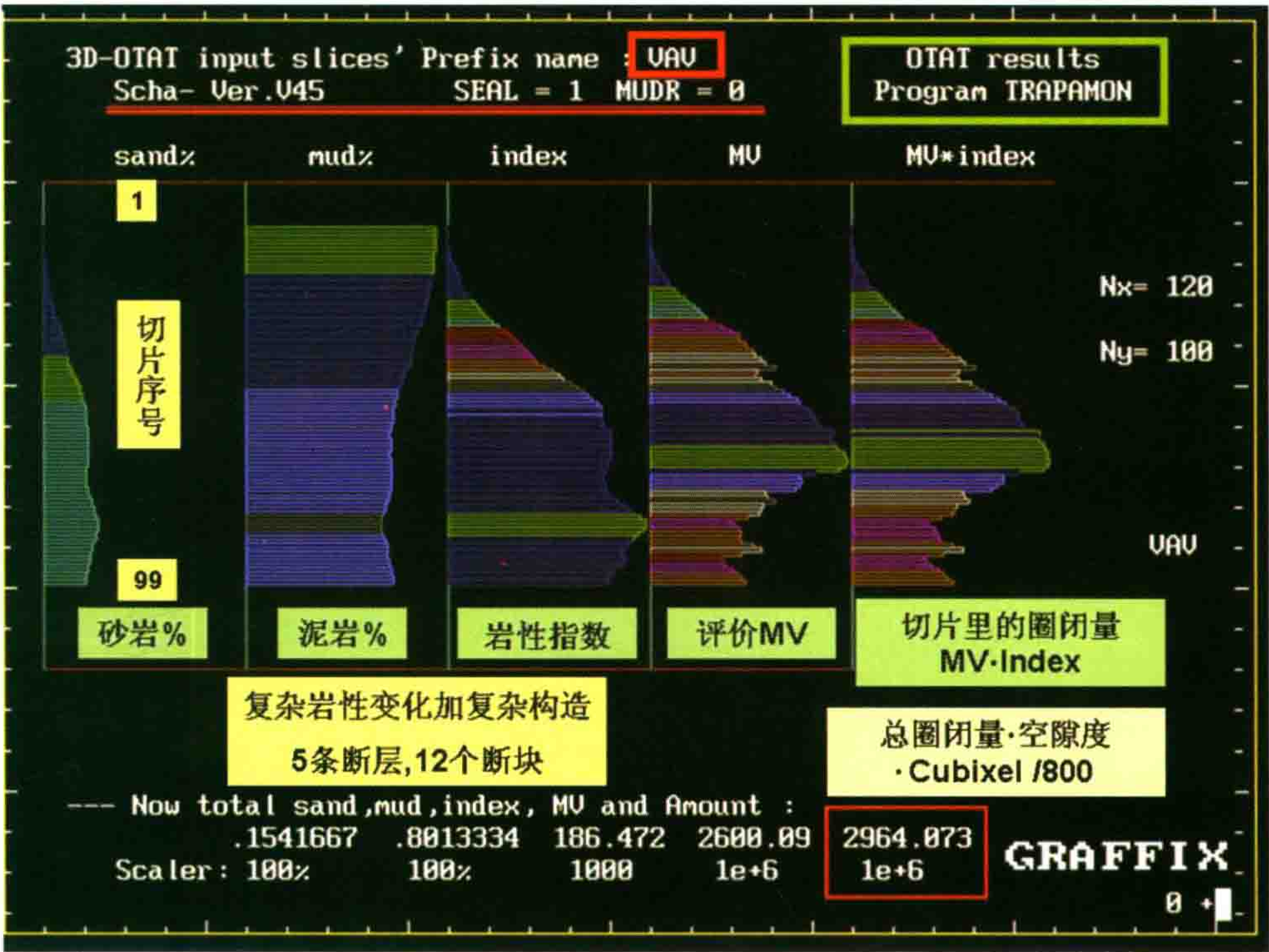


图43 试验模型4的圈闭量柱状图

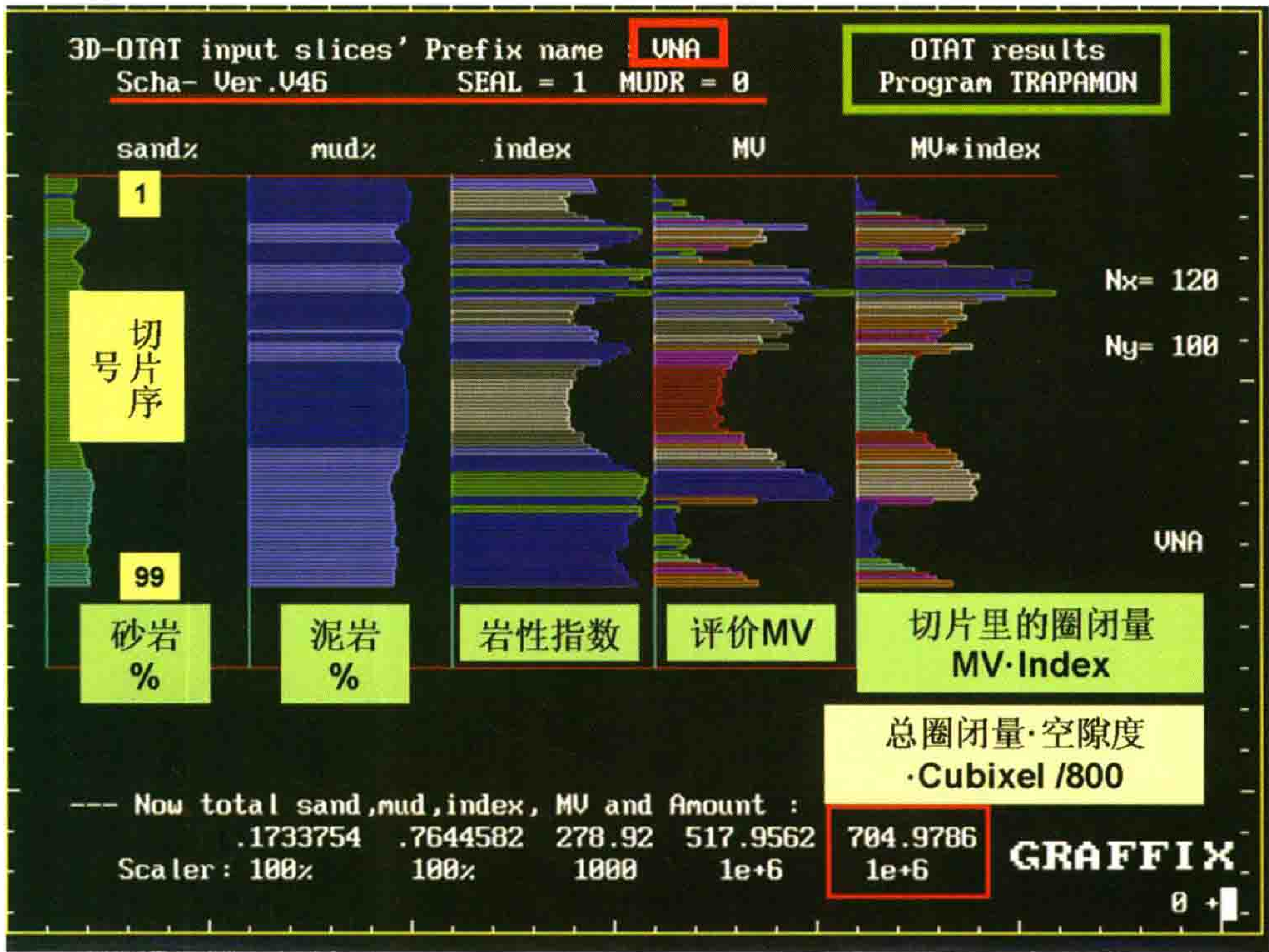


图44 试验模型2的圈闭量柱状图

通过比较图43和图44所示两个试验模型[试验模型2(图18)：背斜复杂断块模型，7条断层，20个断

块；试验模型4(图33～图35)复杂岩性变化加复杂构造，5条断层，12个断块]的圈闭量柱状图，**前后这两个模型体积是一样的。岩性不一样，断裂系统也不一样，结果含油气的圈闭量差四倍**(圈闭量见图42和图43下方红圈内数据)！

八、程序的新功能

(一)用圈闭分析寻找剩余未动用储量区

背斜复杂断块模型如图45所示，7条断层，20个断块。在此模型里布井12口(布井程序运行记录见图46)，均匀网格。假定每口井把它钻遇的油气采完，让我们看看未动用储量还有多少？

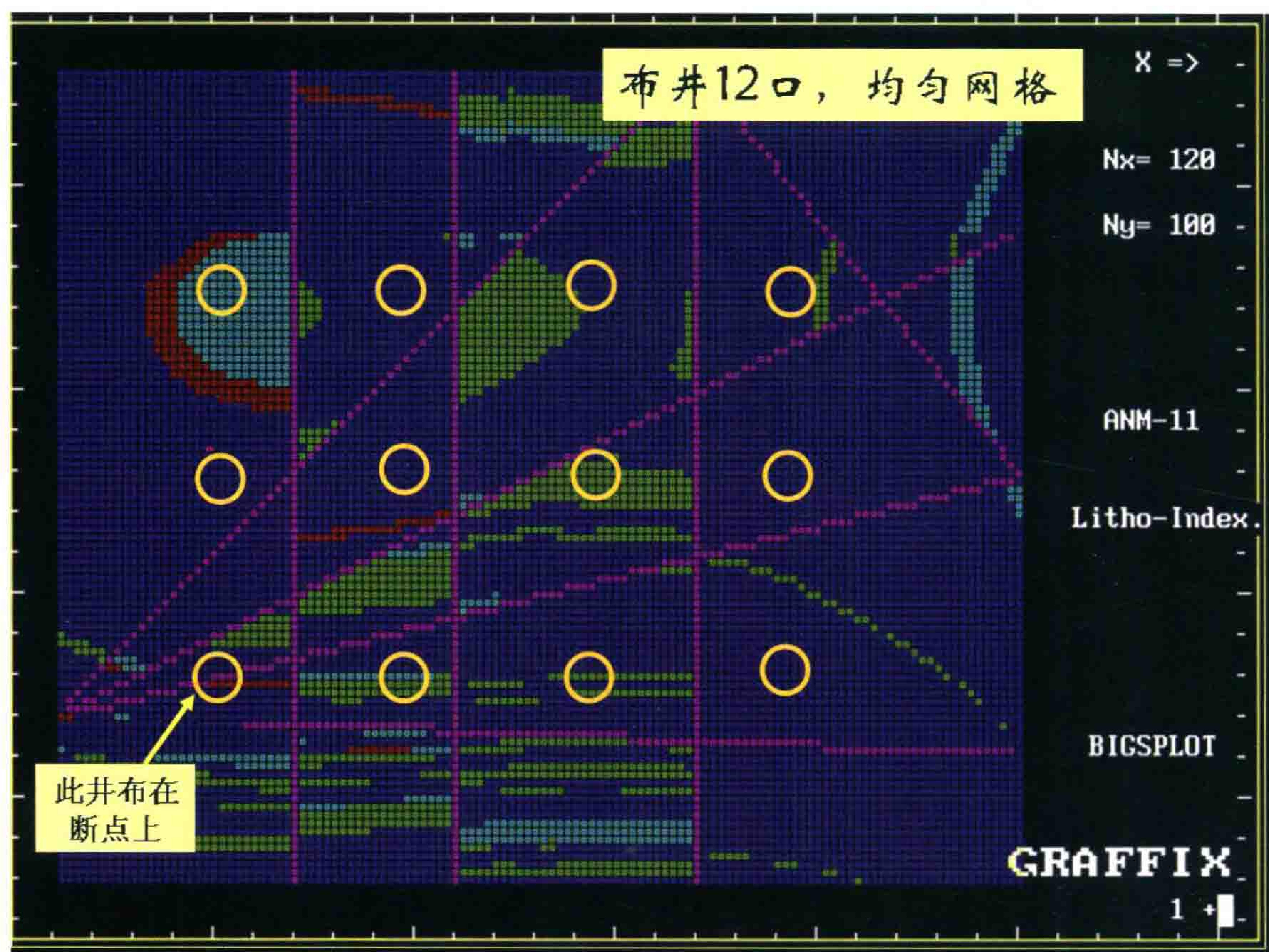


图45　背斜复杂断块模型

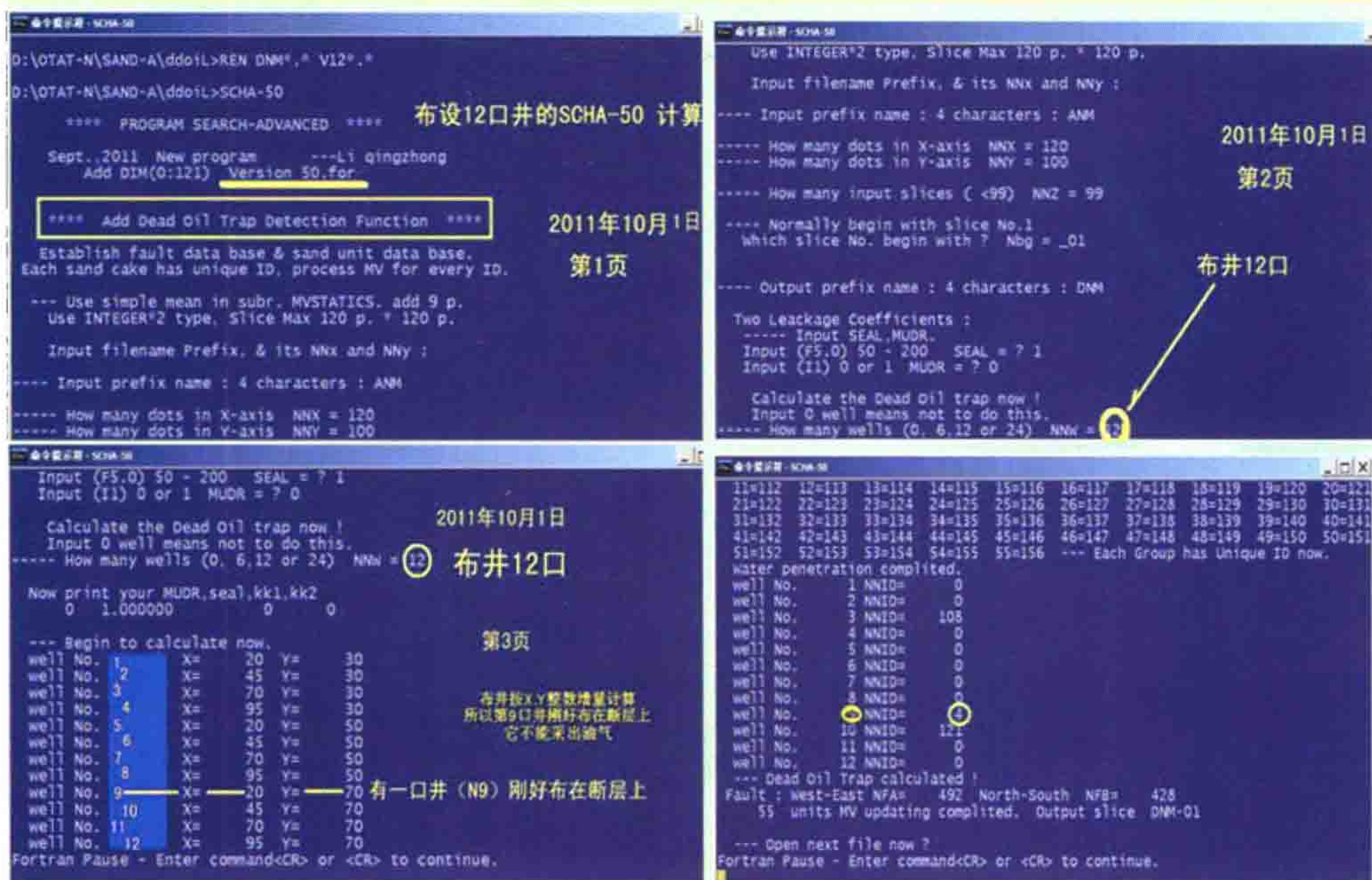


图 46　布井程序运行记录

（二）先看过井剖面的情况

凡是被井打到的储集层，油气被采光，变成水层（绿色）。比井中储集层海拔位置更高的地方，成为"死油区"，那里的油气采不出来，成为"未动用储量区"。

图 47～图 52 所示为不同切片采油前后的圈闭评价剖面比较。

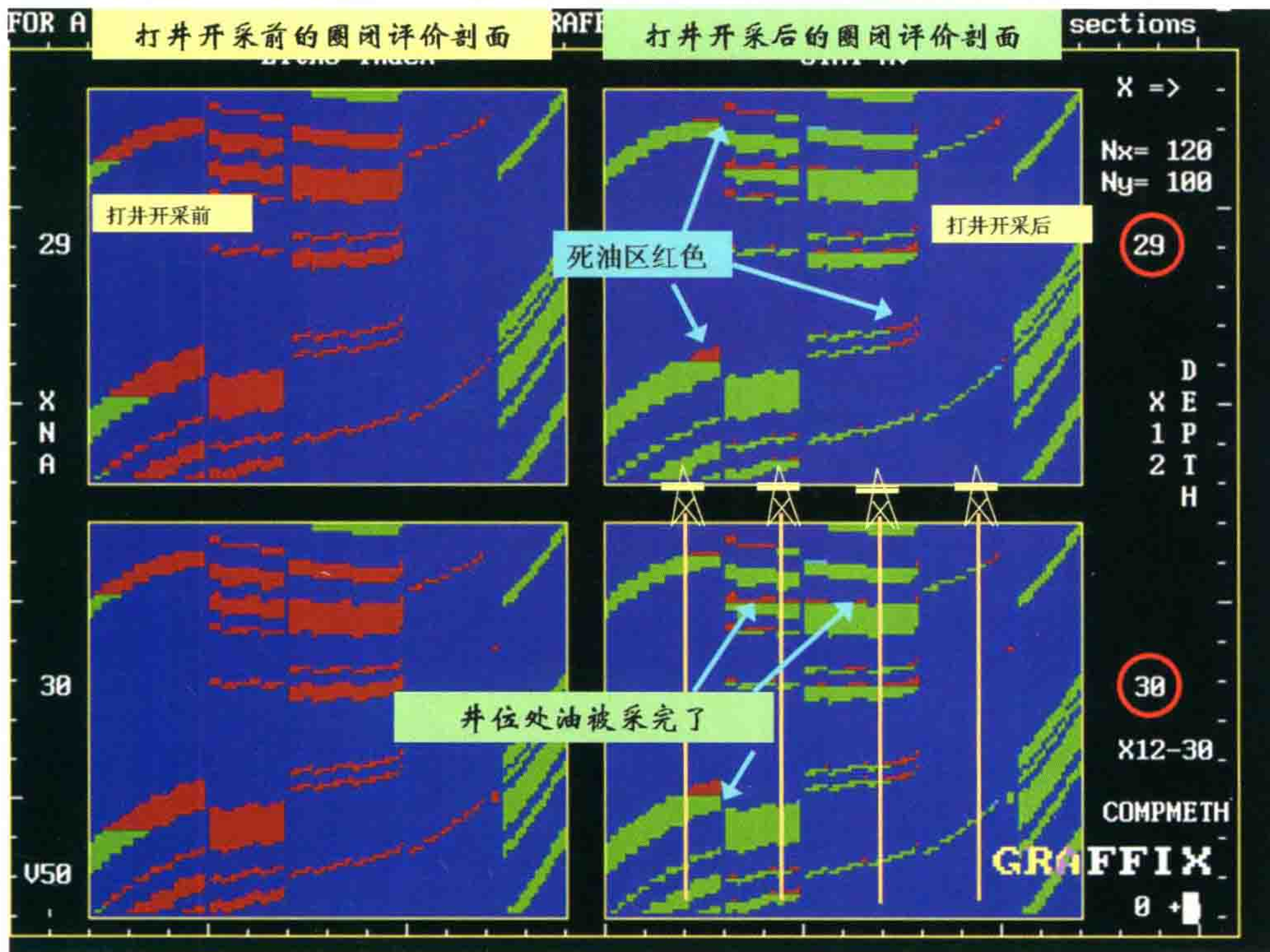


图 47　x 方向剖面编号 29、30 采油前后的圈闭评价比较

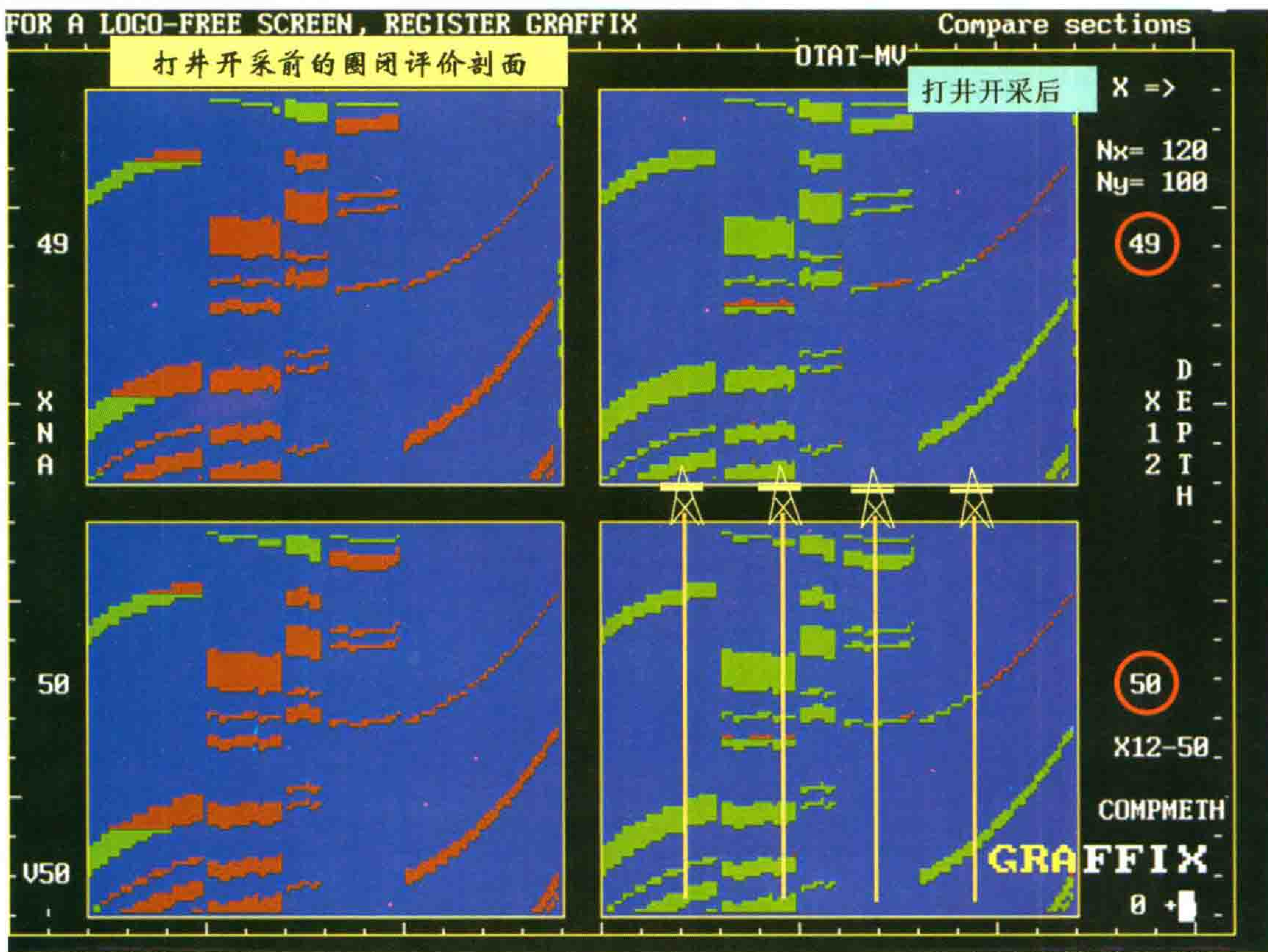


图 48 x 方向剖面编号 49、50 采油前后的圈闭评价比较

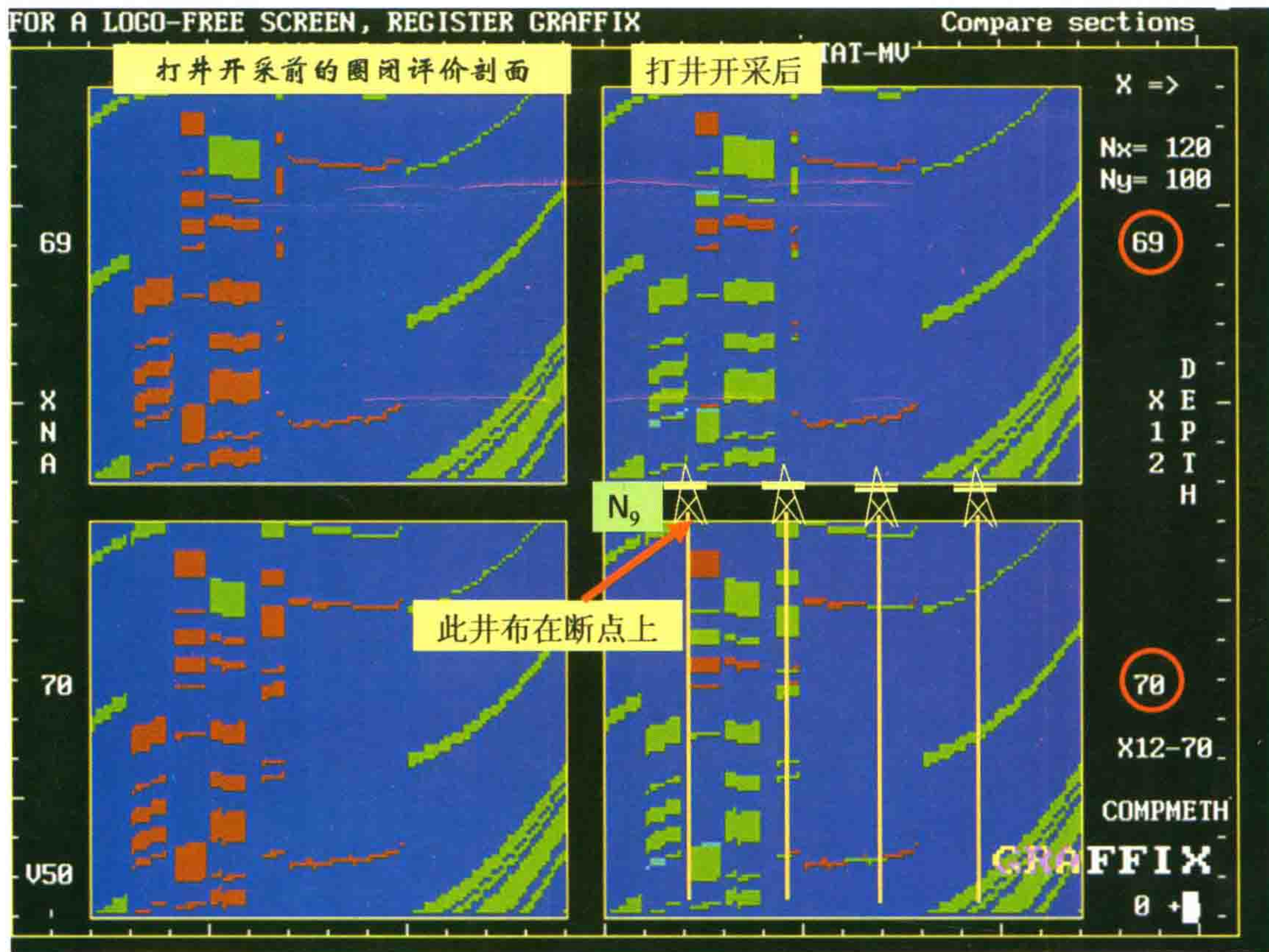


图 49 x 方向剖面编号 69、70 采油前后的圈闭评价比较

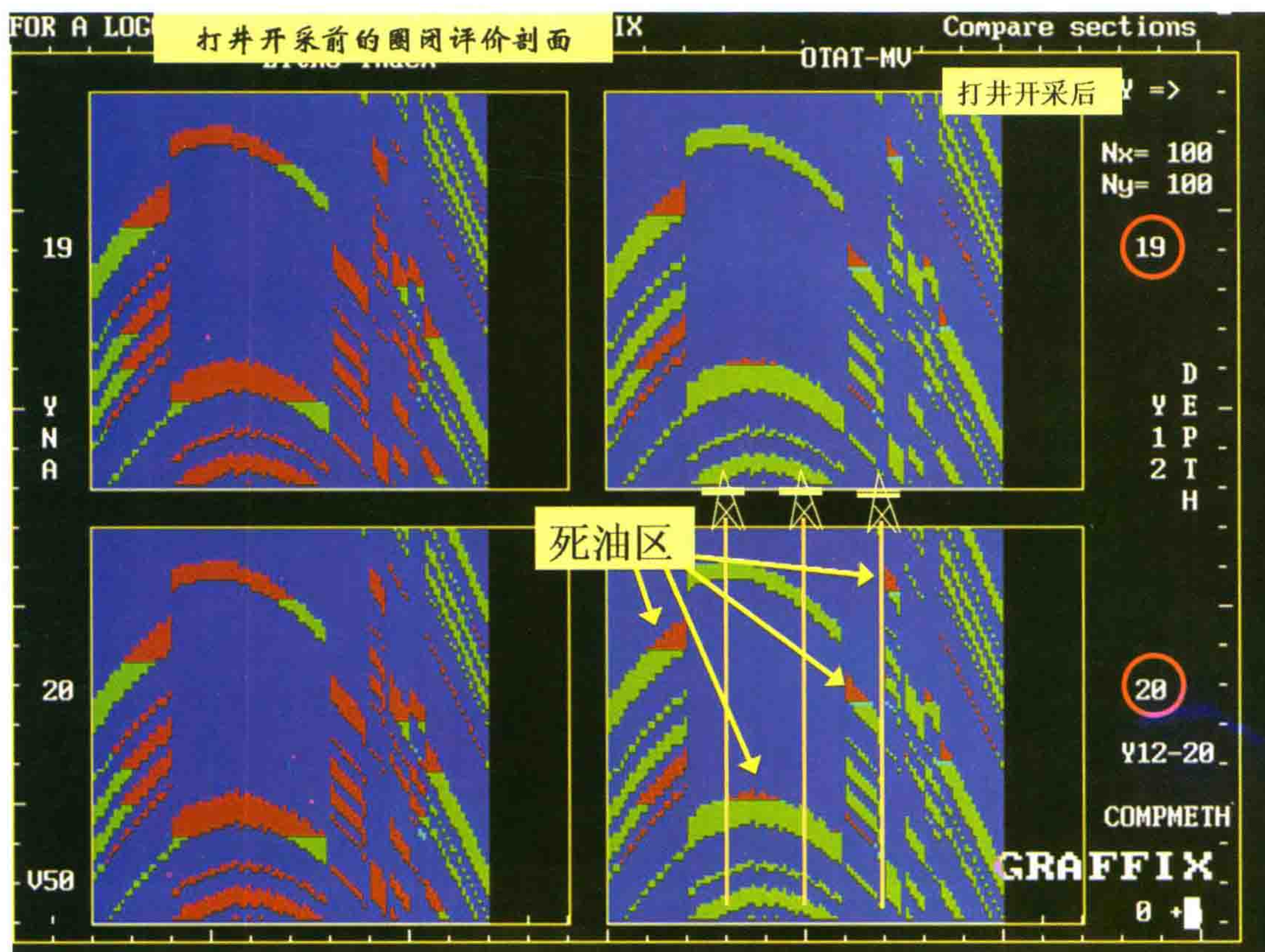


图 50 y 方向剖面编号 19、20 采油前后的圈闭评价比较

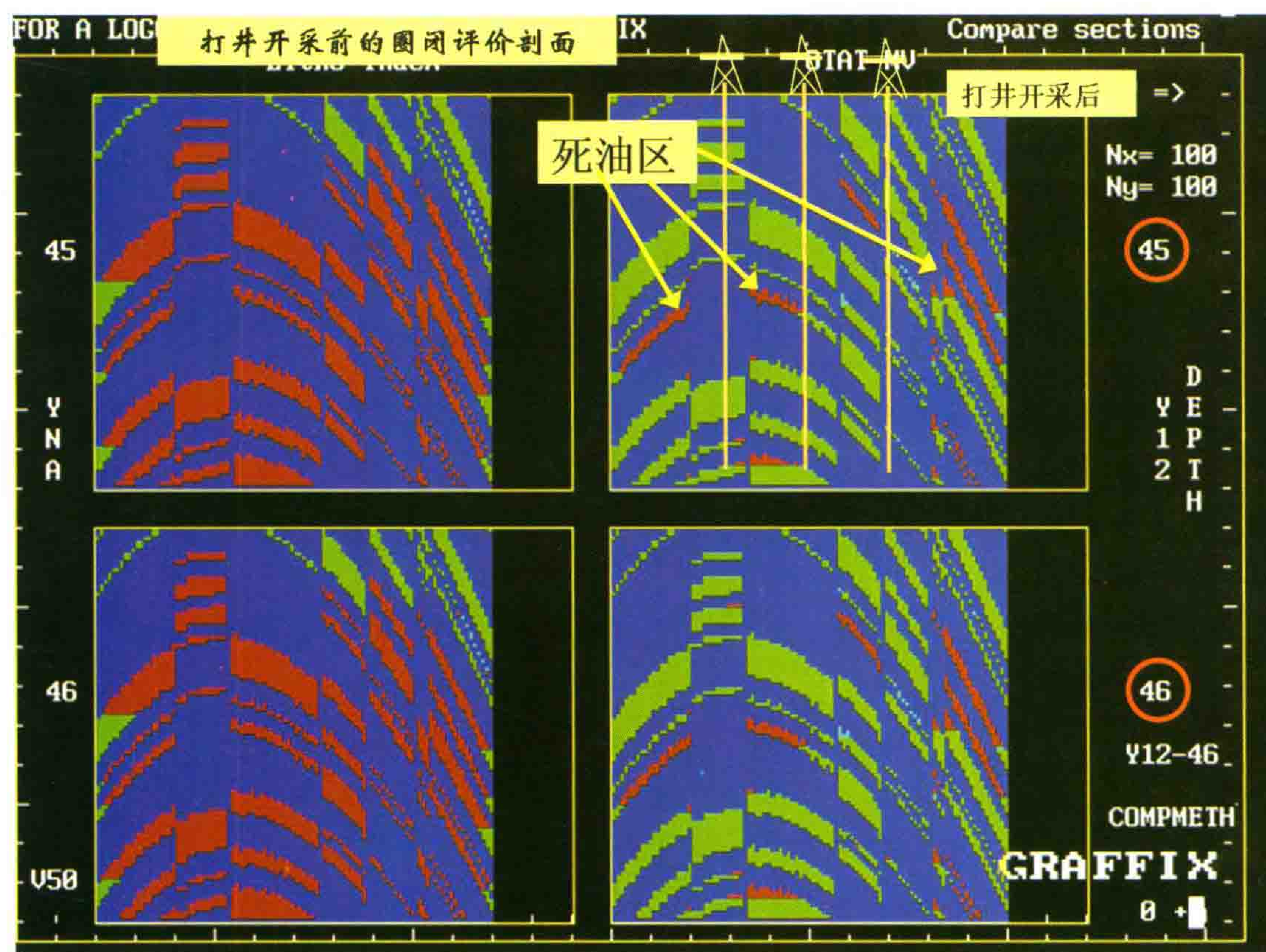


图 51 y 方向剖面编号 45、46 采油前后的圈闭评价比较

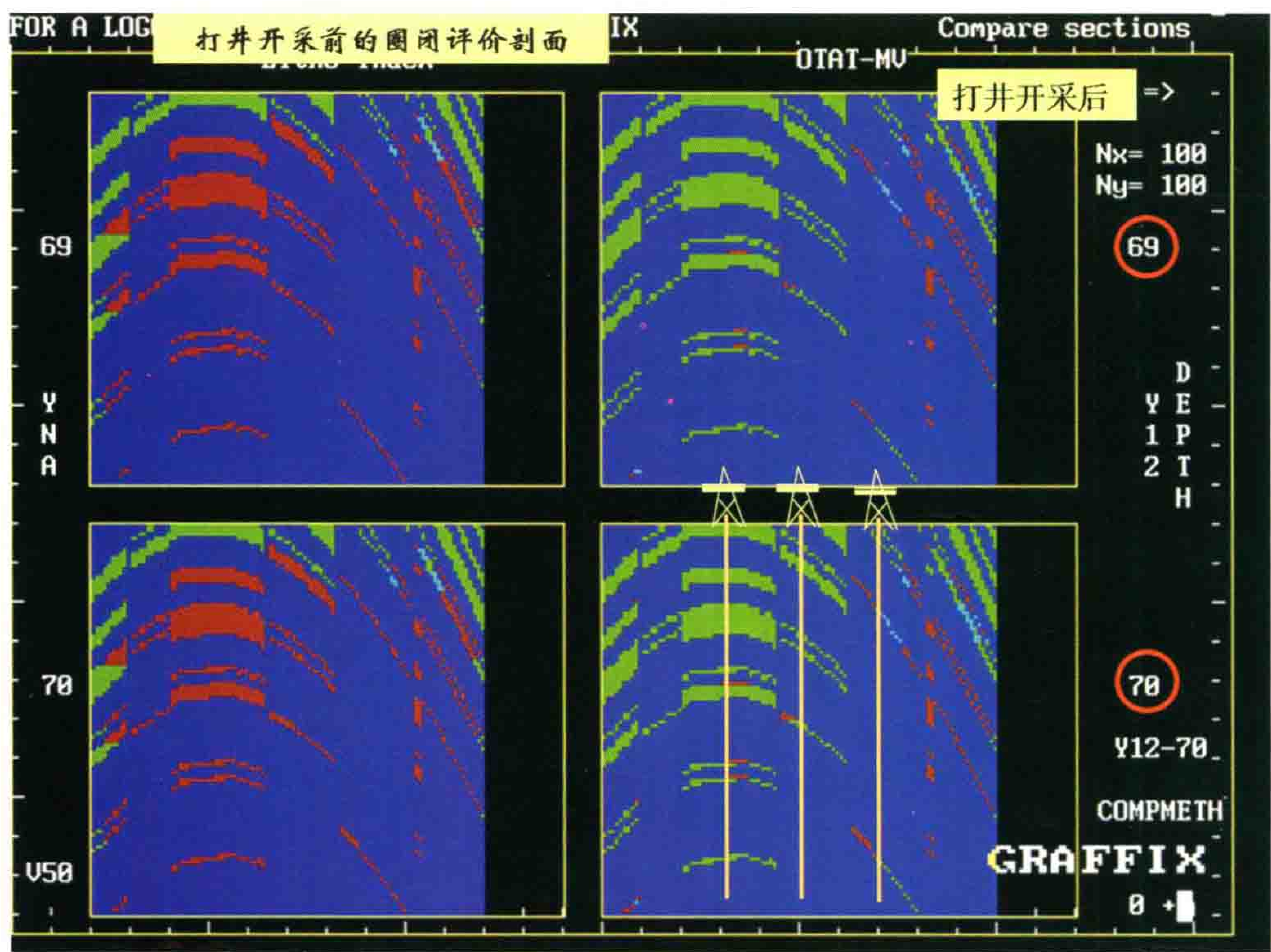


图 52 y 方向剖面编号 69、70 采油前后的圈闭评价比较

（三）不过井的切片里的情况

图 53 和图 54 为部分切片的开采前后圈闭评价比较。**平面上看，左边还有未动用的可能含油的地方，还有不少评价较高的红色区，它们是“未动用储量区”。**

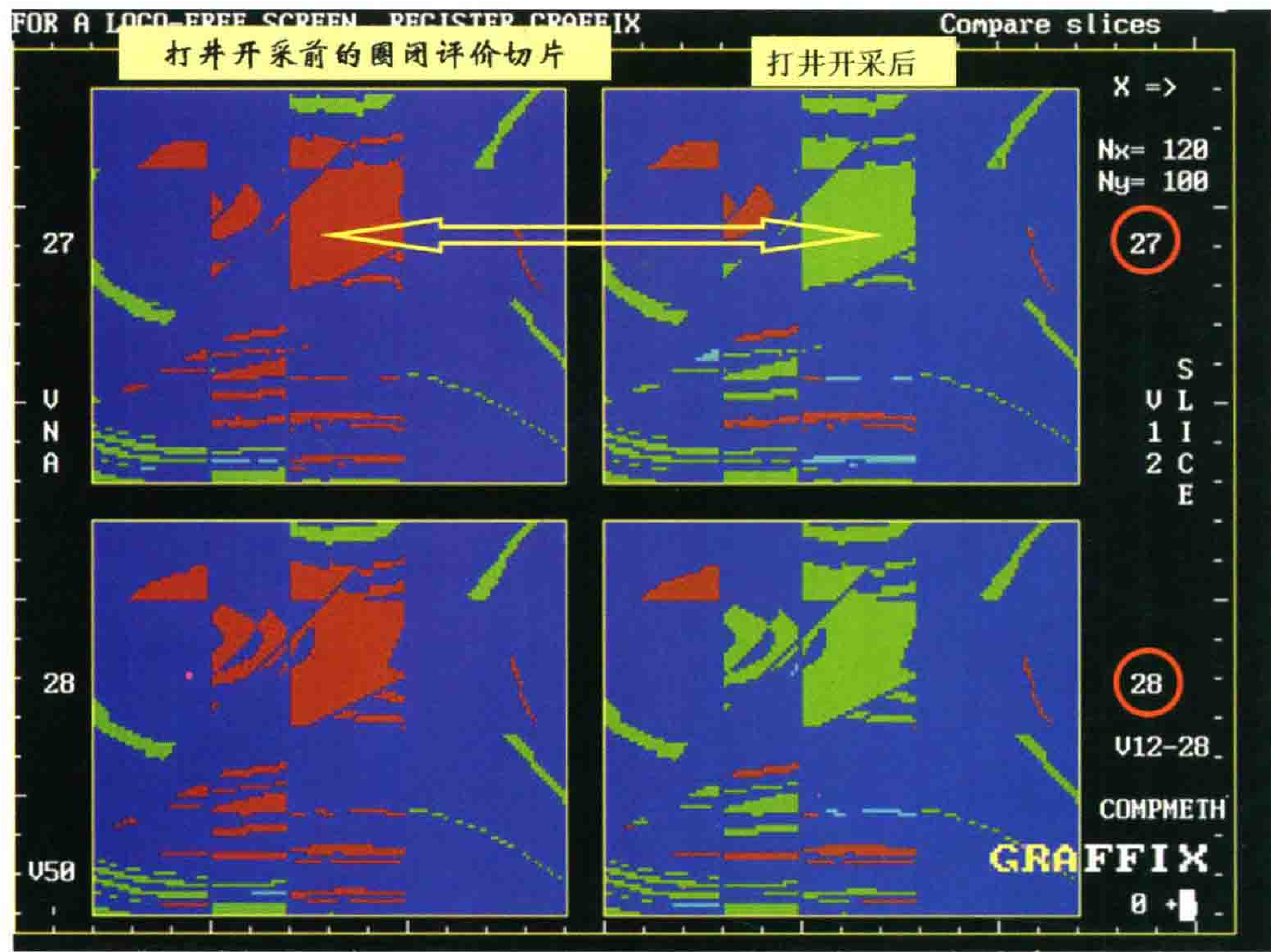


图 53 切片编号 27、28 开采前后圈闭评价比较

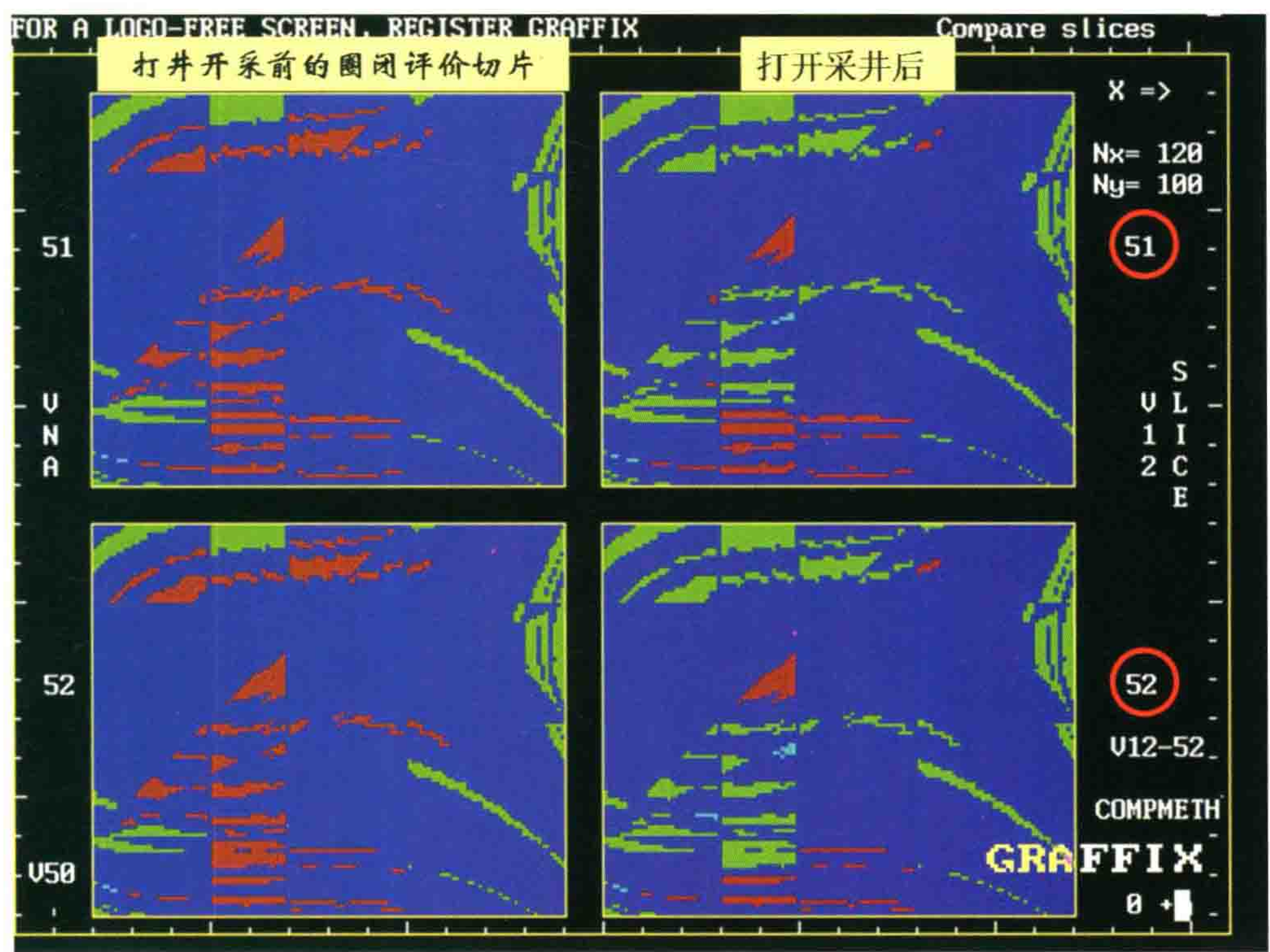


图 54 切片编号 51、52 开采前后圈闭评价比较

（四）再看不过井的切片及剖面的情况

图 55、图 56 和图 57 分别为切片、y 方向和 x 方向剖面开采前后的圈闭评价比较，可以看到，在左边评价图中还有未动用的可能含油的地方。

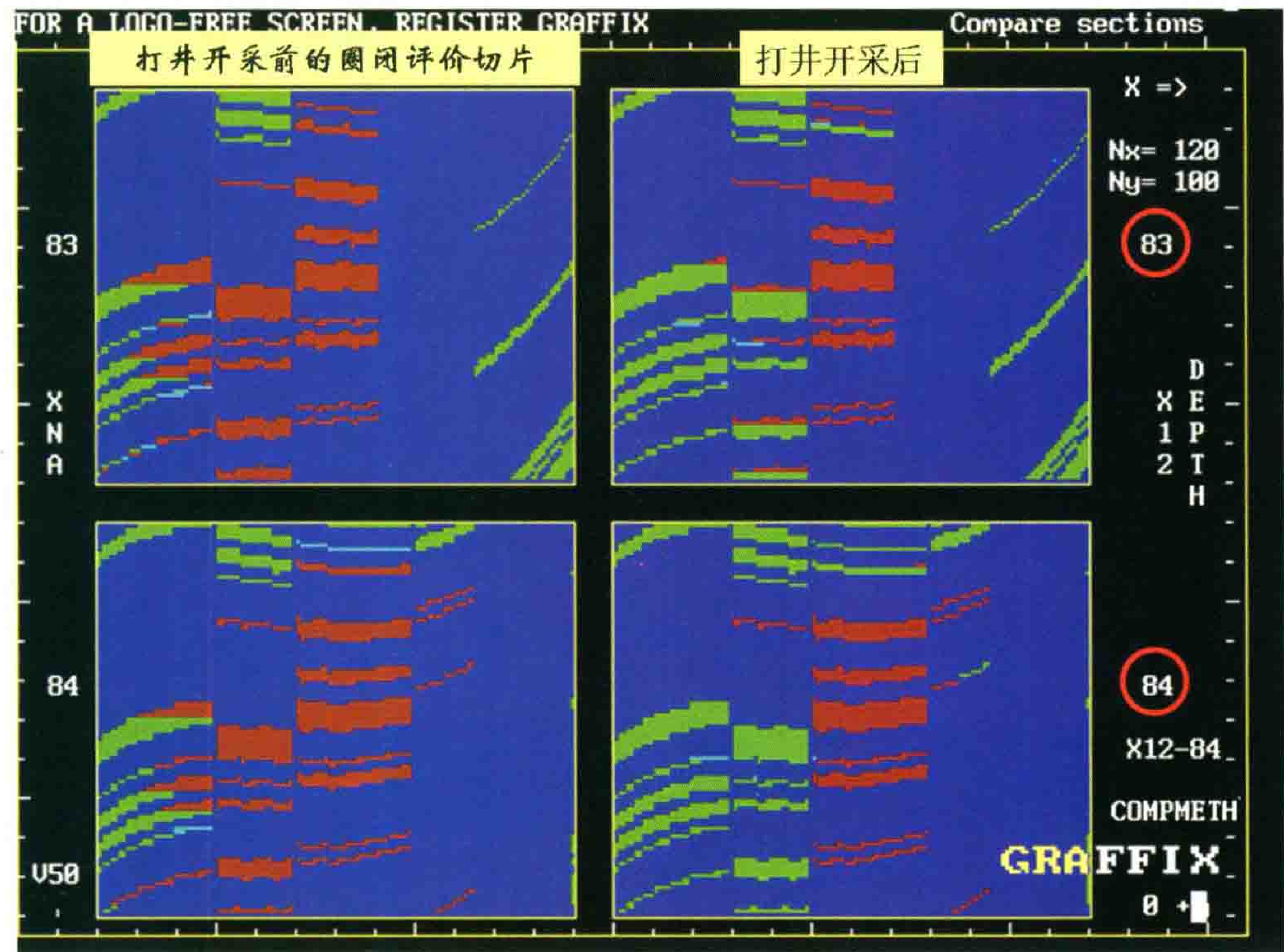


图 55 切片编号 83、84 开采前后圈闭评价比较

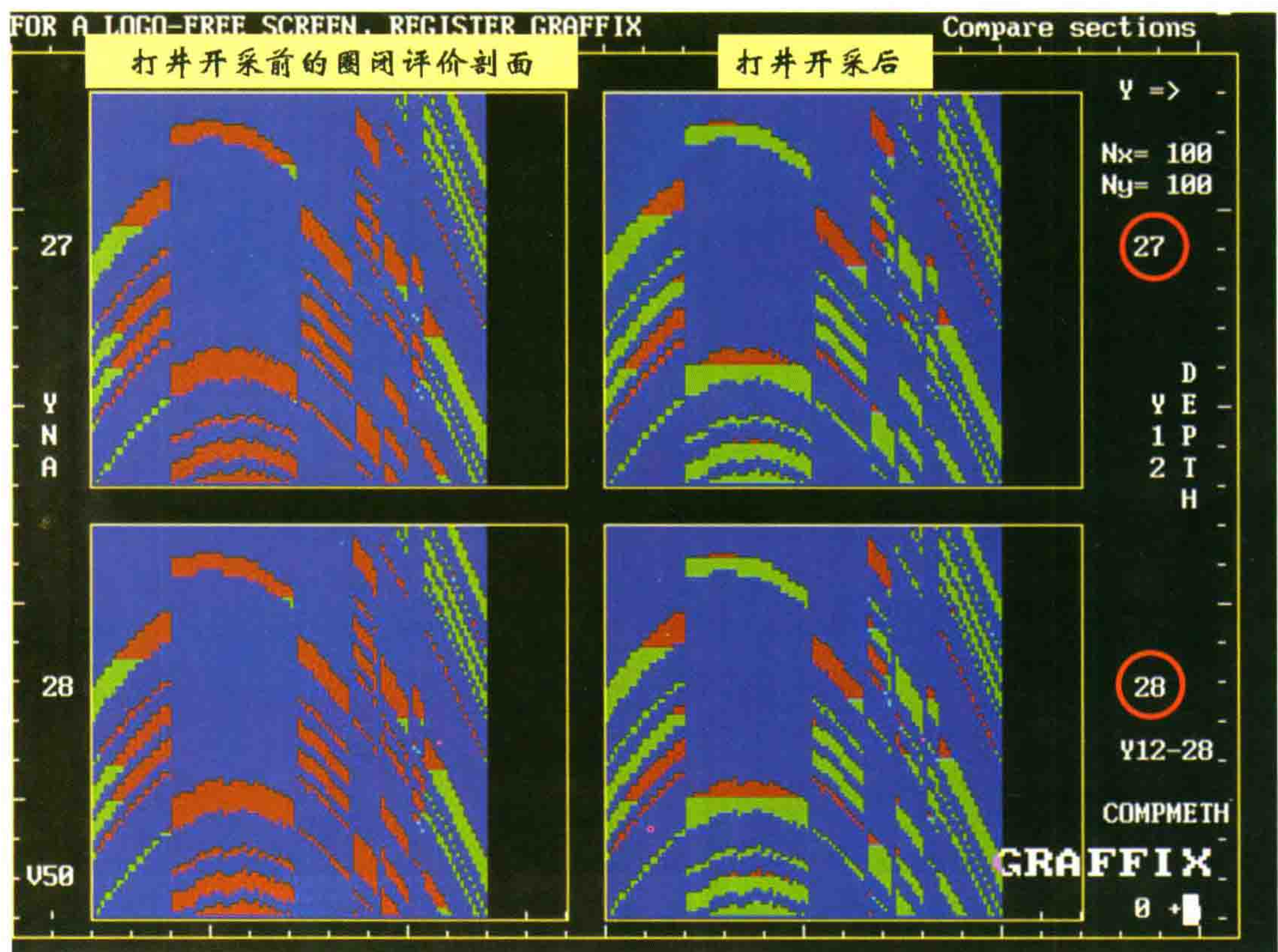


图 56　y 方向剖面编号 27、28 采油前后的圈闭评价比较

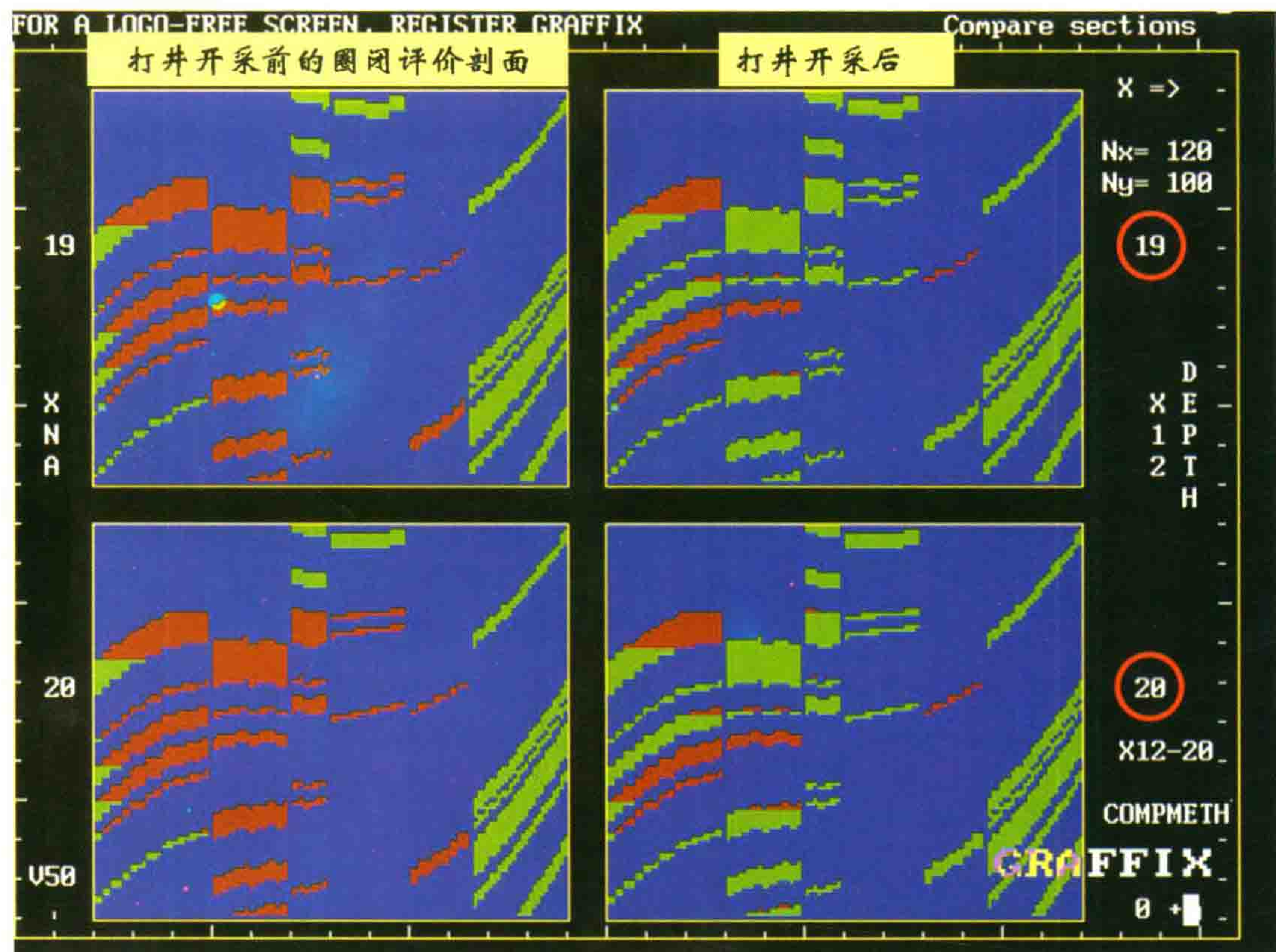


图 57　x 方向剖面编号 19、20 采油前后的圈闭评价比较

（五）“甜点图”的打井前后的比较

“甜点图”的打井前后的比较，如图 58、图 59 所示。

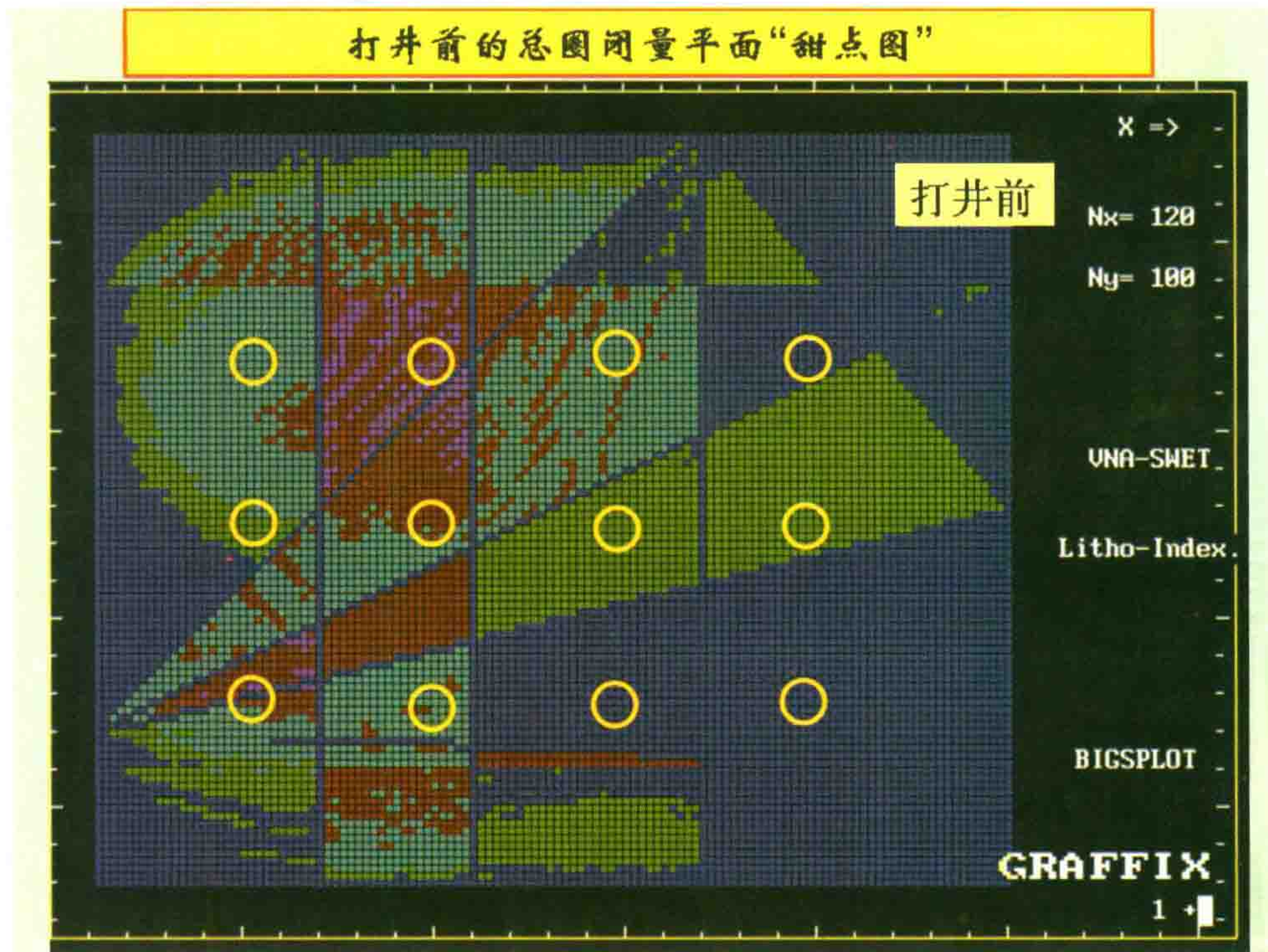


图 58　打井开采前的总圈闭量平面“甜点图”



图 59　打 12 口井后的总圈闭量平面“甜点图”

（六）圈闭量的柱状表达图

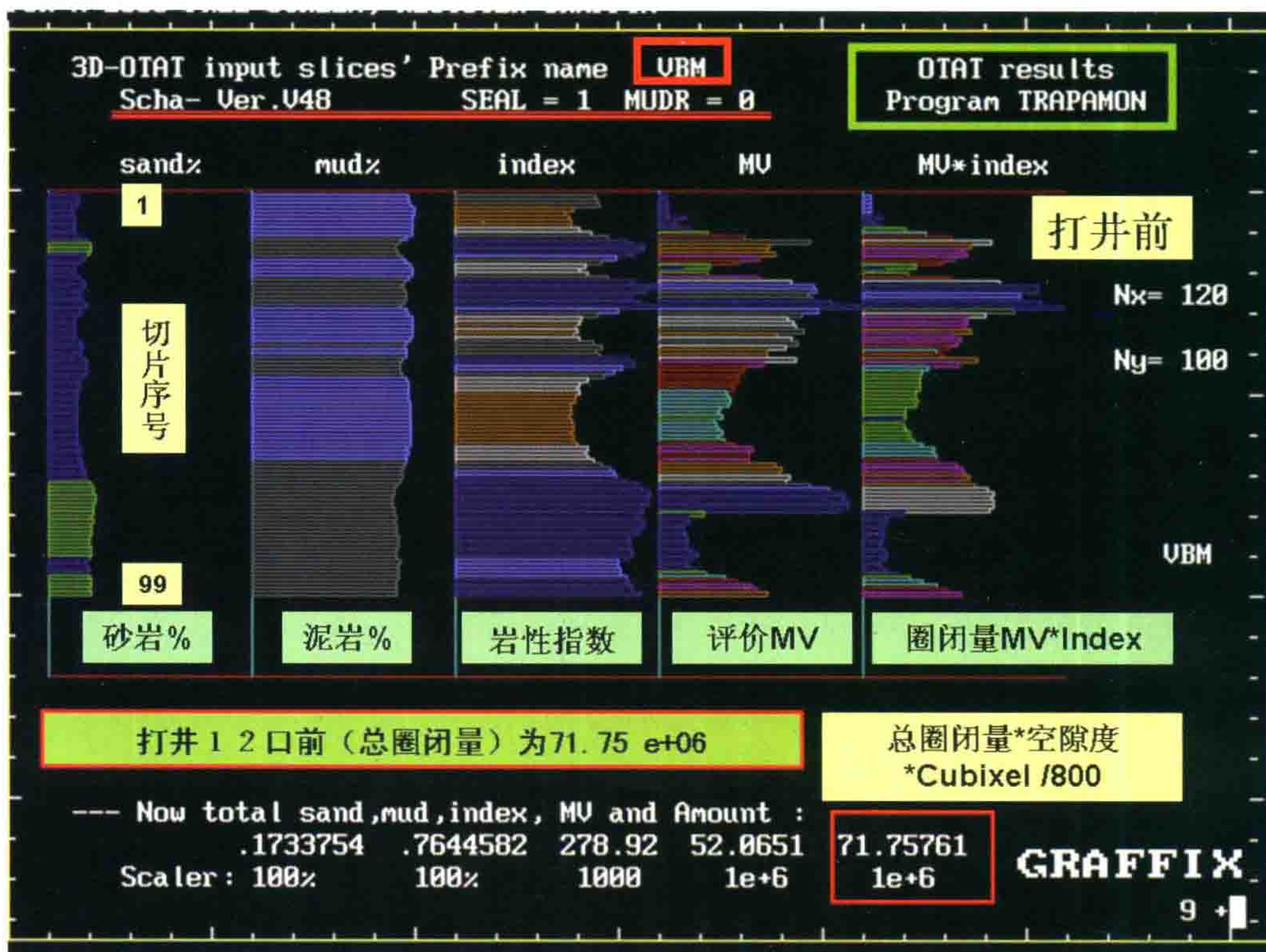


图 60　打井开采前总圈闭量评价柱状表达图

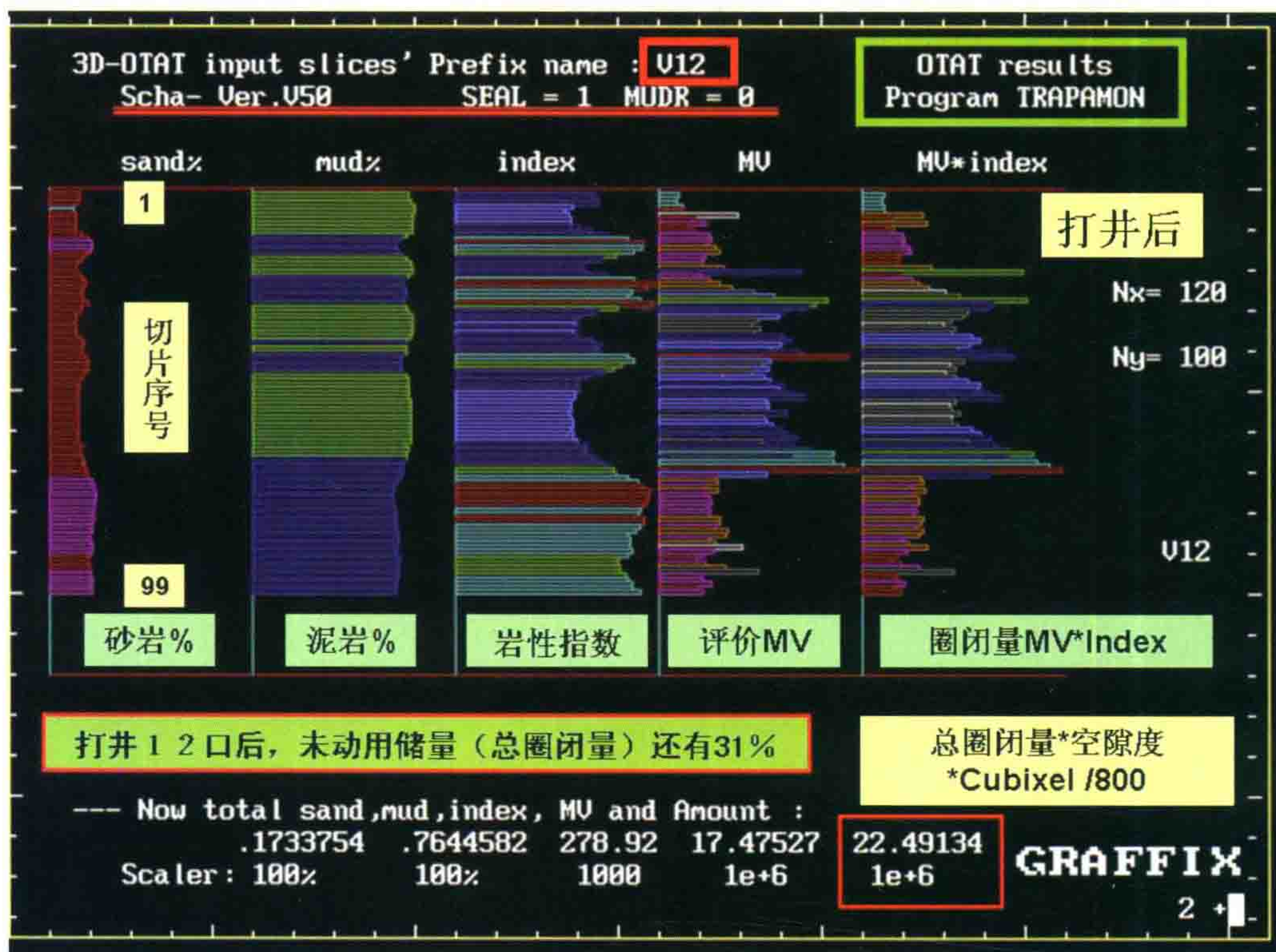


图 61　打井开采后总圈闭量评价柱状表达图

图 60 和图 61 为打井开采前后总圈闭量评价柱状表达图。可以看到，打 12 口井开采后，未动用储量

(总圈闭量)还有31%。

下面是对程序的几点说明。

(1) **从SCHA-48版本开始是比较稳定的程序。**

每个砂饼的圈闭最高评分改为800分。

(2) **SCHA-49版本修改了断层漏失计算规则。**

从每个砂饼出发,把每个砂点的坐标在断层文件中寻找是否有它,没有就过。如果有它,就按下列规则评分。

① 如果断层对面是泥岩,不漏。若MUDR=1,就每遇一个泥点加10分,累计加分不得超过100分。

(2) 如果断层对面是砂,如本砂饼评价低于对方,不扣分。若高于对方,则扣分。

扣掉 LEAK=DDMV*(YXZH)/SEAL/4

DDMV是双方评价之差,YXZH是双方岩性指数之和,它最大为6最小为2,平均为4,所以还要除以4。

SEAL是漏失系数,由用户指定。若SEAL=1,就意味遇到对方一颗砂,就漏完YXZH。若SEAL=5。就意味遇到对方5颗砂,才漏到和对方一样。

(3) 以上加分及扣分不是马上执行,而是不断累加,直到整个砂饼计算完了,一次性把扣分结果分配到此砂饼的每一个点。

SCHA-50版本增加剩余未动用储量计算功能。其他内容和SCHA-49一样。

程序在最前面问用户要几口井?如果回答0,则意味着不计算剩余未动用储量。于是往下就和SCHA-49一样了。

如果回答要6、12或24口井,程序自动按均匀井网布设。

今后完全可以改成由用户输入任意口井的坐标,此程序也能运行。

为了对比打井前和打井后剩余未动用储量的效果,需要调用SCHA-50程序两次。

SCHA-50.for目前是比较稳定的程序。

小立方元CUBIXEL的大小以10 m×10 m×1 m为好,100 km^2的bin是1000×1000样点。

从总圈闭量计算预计储量的办法是:

总圈闭量=SUM(MV*INDEX) * CUBIXEL*平均孔隙度 /(2*800)

今后,参数使用以SEAL=5~10(与样点总数有关),MUDR=0为合适。

(七) 关于TRAP-3D圈闭评价MV在上下切片间的传递中的问题

我现在采用的办法如下。

把上切片MM里的评价MV传递到互相连通的下切片LL去。如果下切片LL与上切片中有n个砂点连通,我们把n个上切片的MV求其平均值,传递到下切片MM中去。计算中,每碰到一个上切片的一颗砂,就调用一次用子程序:

CALL MVSTATICS(MVO,NM,SUMA,MEANV,MAXV,MINV)

其中MVO是这次进来的评价MV数值,NM是进来的累计沙点数,SUMA是累计MV值,MEANV是平均值,MAXV是最大值,MINV是最小值。

我们现在采用的办法是用MEANV平均值传递到下切片去,这样理论上似乎比较合理。

但是我们发现,计算结果有极少数情况在垂直剖面里,同一个砂体内部有MV评价上小下大(上水下油)的情况。这是由于该砂体的MM切片与上方LL切片的两个砂饼相遇,一个MV很高,一个很低(低到是水)。如果取二者平均值,结果就高了些,应该变水才对。到下面切片又遇到MV变高,就出现似乎上水下油的情况。**当然,如果希望剖面上没有MV上小下大的情况,只需调用子程序中的MINV,取其最小值就可以。**

我在程序里增加一个由用户选择的开关 KK3。当 KK3=0 时，传递 MV 取最小值 MINV；当 KK3=1 时，传递 MV 取平均值 MEANV。

在第 202 行号后面，最后调用子程序：

```
CALL   MVSTATICS(MVO,NM,SUMA,MEANV,MAXV,MINV)
```

之后，加上一句：

```
If (KK3. eq. 0) MV= 8 * int(MINV * 0. 125)
```

就可以。就不会出现上水下油的情况了。

九、对实现 TRAP-3D 的设想

下一步主要的工作重点如下。

(1) 把我的程序改写成 C++，SCHA-50. for 不用改，可以由 C++调用。

(2) 油藏静态描述要达到 10 m×10 m×1 m 细化程度，要解决从井出发，实现数据的内插与外推。

(3) 我写的 SANDINTE 可以在地震层位控制下实现数据的内插。在数据外推方面，我写了 EXTRA3 程序，可能还不够好，还要考虑使用克里金(KRIKING)方法、最小曲率法、距离反比法等其他方法。并且要实现层位数据输入从屏幕上人机联作，可修改。

(4) 希望一年后，选择东部地区三维好资料地区，开展实际资料试验，验证油藏分布及寻找未动用储量。

希望我们通过共同努力，在不久的将来推出 OTAT 的三维 TRAP-3D 新软件。

文章编号 304-4



TN 油田的 TRAP-3D 试验结果

此文是将三维圈闭分析技术用于实际资料的结果，显示了该方法的良好实用效果。

2013 年 3 月，首次在 TN 油田运行获得了可喜的成果。TRAP-3D 三维圈闭分析技术完成了连续的切片的和剖面的圈闭评价，它与探井判断的含油范围基本吻合，我们的图件更具有定量的概念。除了断块圈闭之外，还包括岩性圈闭，并且最后画出“甜点图”，计算出圈闭体积。本方法可以在测区内把构造圈闭、断块圈闭、岩性圈闭及地层圈闭，统统找出来。至此，已经证实我们的三维圈闭分析的思路正确、程序正确、运行正确，它是今后很有前途的一种找油的工具。

TRAP-3D 技术是对石油地质理论中“圈闭”概念的一次升华。它说明过去把构造与岩性分离开来，是不能定义“圈闭”的，也无法准确计算圈闭量。而关于断块圈闭分析的目前所有商业软件，都无法解决复杂断块的三维断块圈闭量的估算，更没有定量分析岩性圈闭的软件，所以，TRAP-3D 软件是十分重要的技术进步。



前言

2012 年 5 月开始，我与东方公司油藏研究中心的张晓敏、张立彬合作，开展了一年的 TRAP-3D 技术开发，突破了砂层内插及断层内插关，用 Petrel 程序完成了第一块 TN 油田的岩性指数 Cube 数据体。

该数据体是一个小油田，工区里有 8 口探井，该试验数据是 18 m×18 m×1 m 的网格。我们从 401 点×401 点范围中切出一个立方体 Cube，它是 301 点×301 点×1 m。研究深度为 1300～1820 m 区间，是该小油田的主要含油部位。

通过程序的测试及改进，到 2013 年 3 月，首次运行获得了可喜的成果。

TRAP-3D 三维圈闭分析技术完成了连续的切片的和剖面的圈闭评价，它与探井判断的含油范围基本吻合。我们的图件更具有定量的概念，除了断块圈闭之外，还包括岩性圈闭，并且最后画出“甜点图”，计算出圈闭体积。

至此，已经证实我们的三维圈闭分析的思路正确，程序正确，运行正确，它是今后很有前途的一种找油的工具。

一、TN 油田数据 TRAP-3D 程序工作过程

本次研究选用数据 Teng 油田，工区数据如下：

线距 (60 ft = 18.28 m)

测区边长 400×18.28=7312(m)

面积 7312×7312=53.46(km^2)

测线编号:纵测线 L700~L1100

横测线 T1000~T1400

切片分析的深度为 1300~1850 m

分析范围:301 点×301 点,点距 18 m,边长 5.48 km。Cube 中每个点的大小为 18 m×18 m×1 m。按每 1 m 为一片切片进行分析。

首先我们的 TRAP-3D 三维圈闭分析结果用测区通过三口井的对比,在图 1 中圈闭评价较高的红色区域与三口井的油层分布位置吻合度甚好。

图 2 表示采用 Petrel 软件,先从反射地震三维数据加上 8 口探井控制,在目的层段作出砂层内插结果。

再把已经内插好的砂层按其储集层好坏,划分为好砂岩 3、砂岩 2、粉砂岩 1 三个等级;把泥岩的岩性指数定为 0(见图 3)。深度 1300~1850 m,是我们作 TRAP-3D 试验的区间,见图 3 中两条水平黑虚线。

再裁去两头数据空白区。从 401 点×401 点裁到 301 点×301 点阵,形成一个数据立方体 Cube。

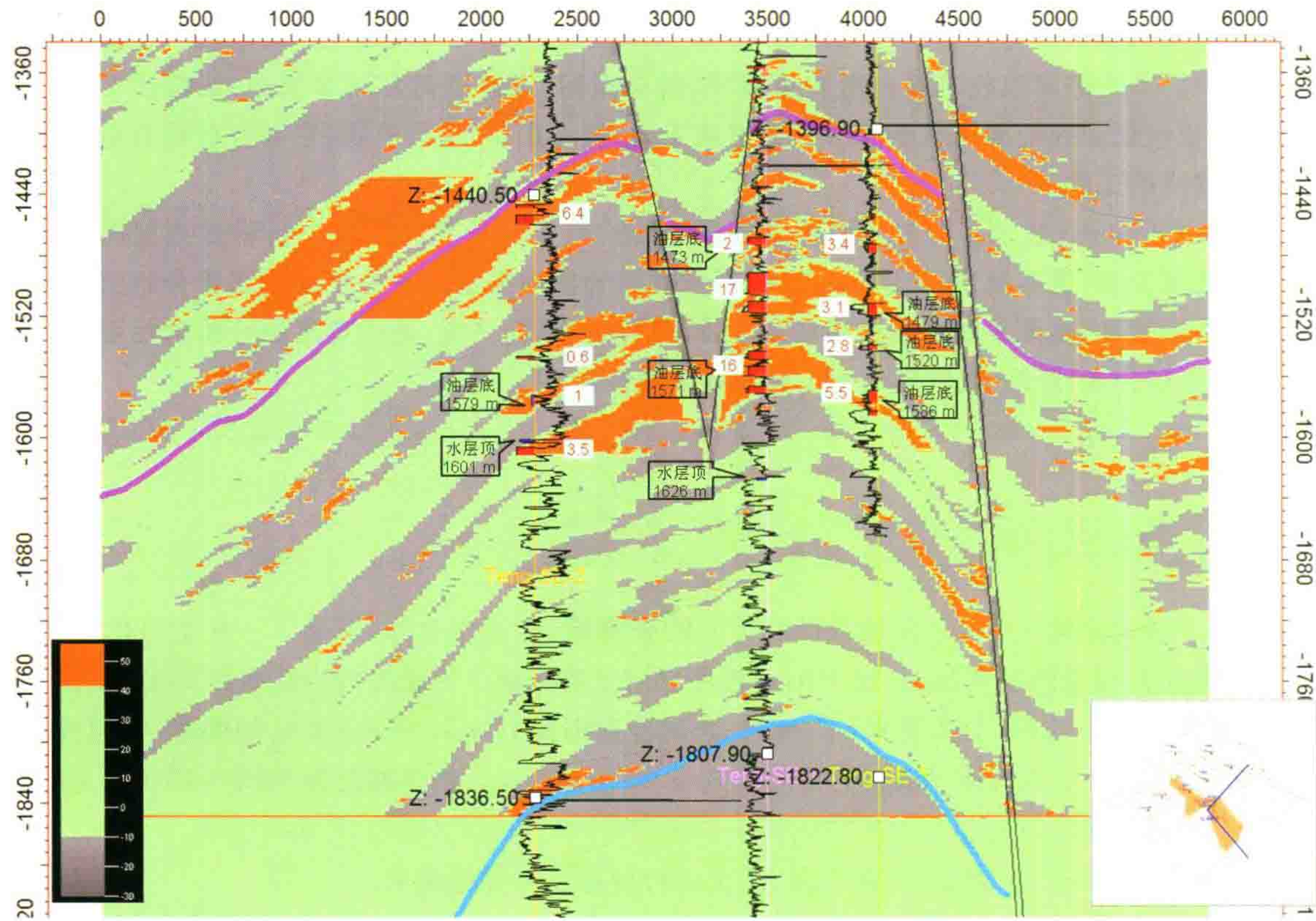


图 1 TRAP-3D 圈闭评价剖面与三口探井的吻合度

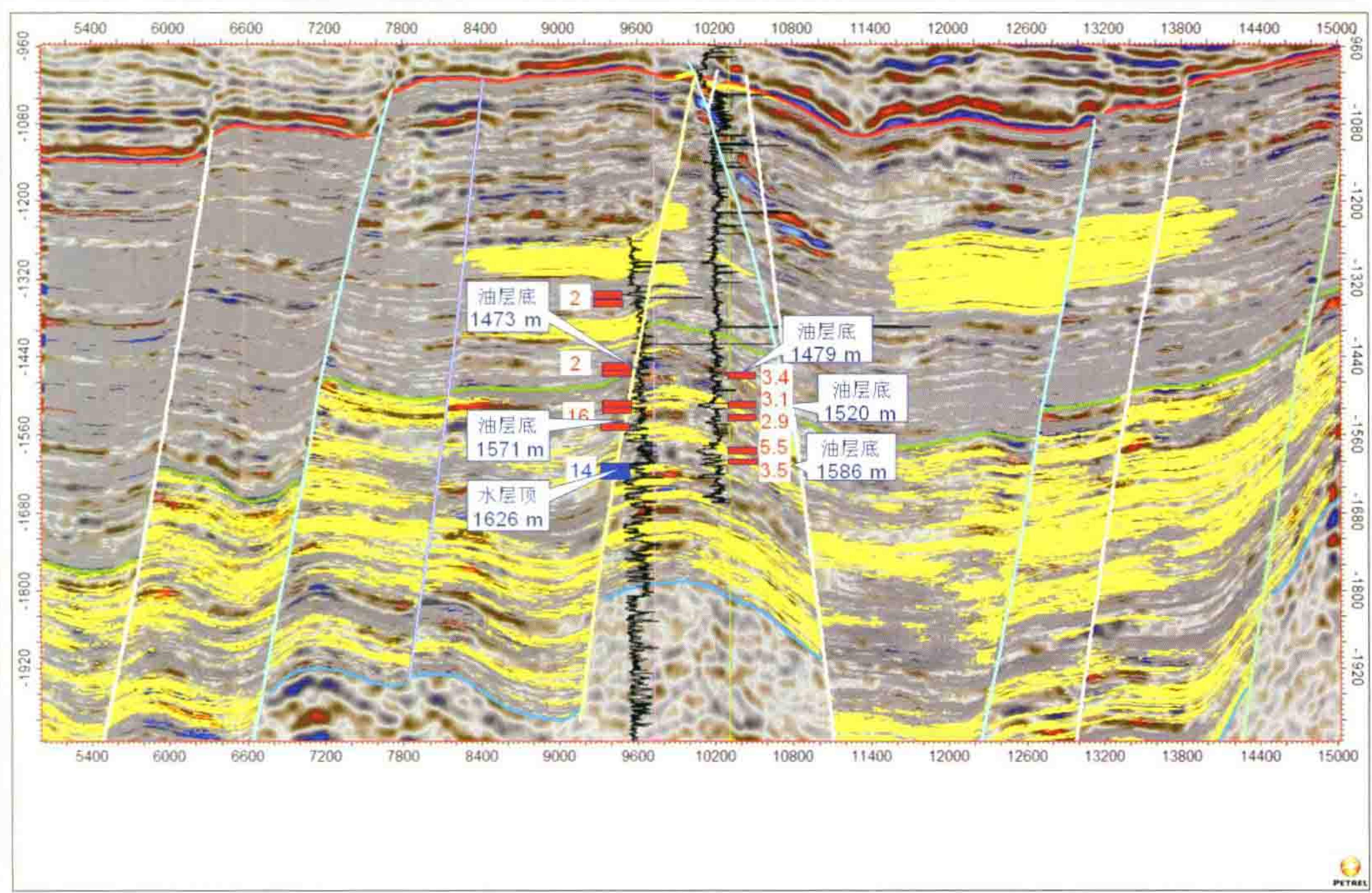


图 2　用 Petrel 软件在井控条件下作砂层内插结果

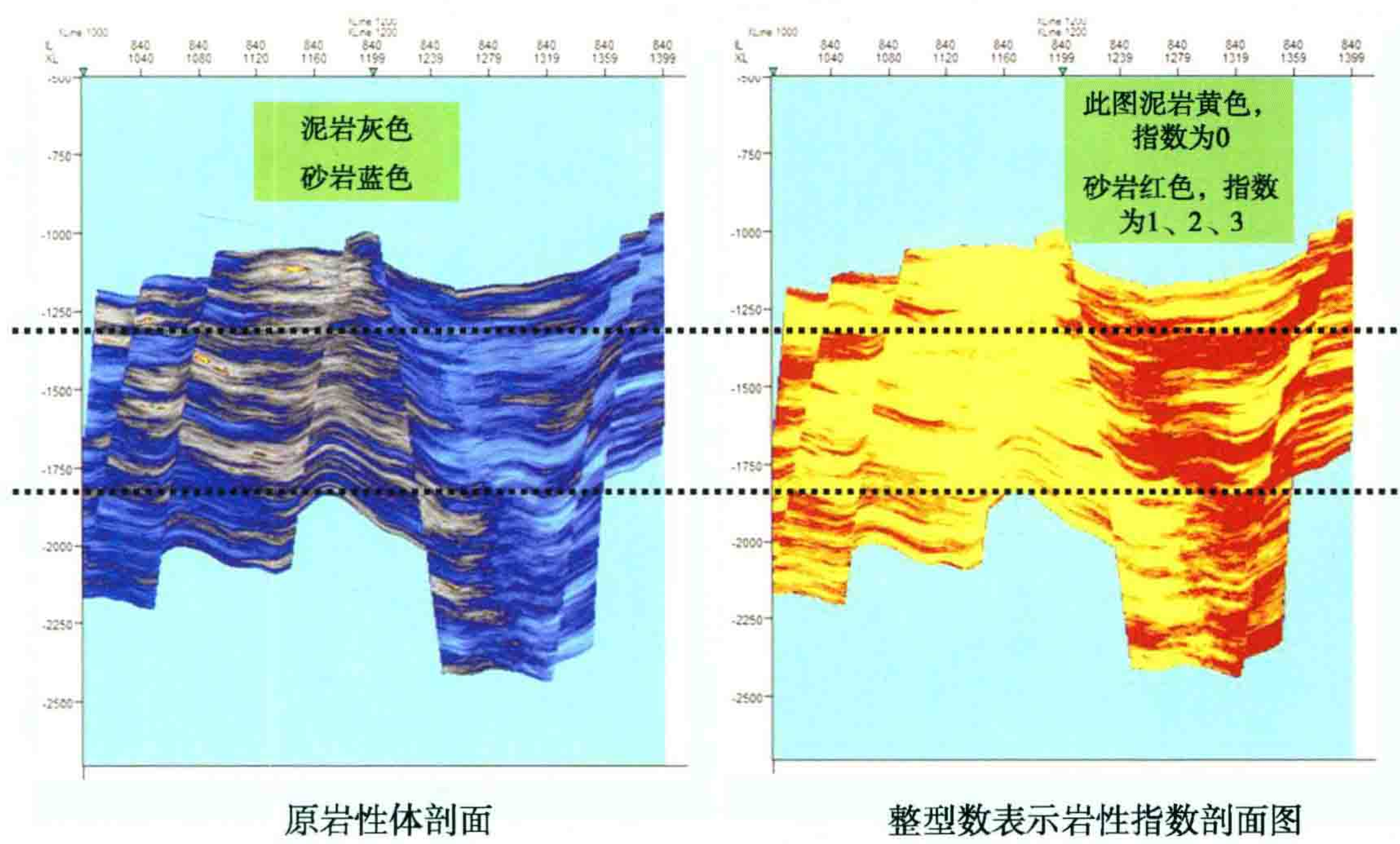


图 3　用 Petrel 软件把内插砂层化为岩性指数剖面

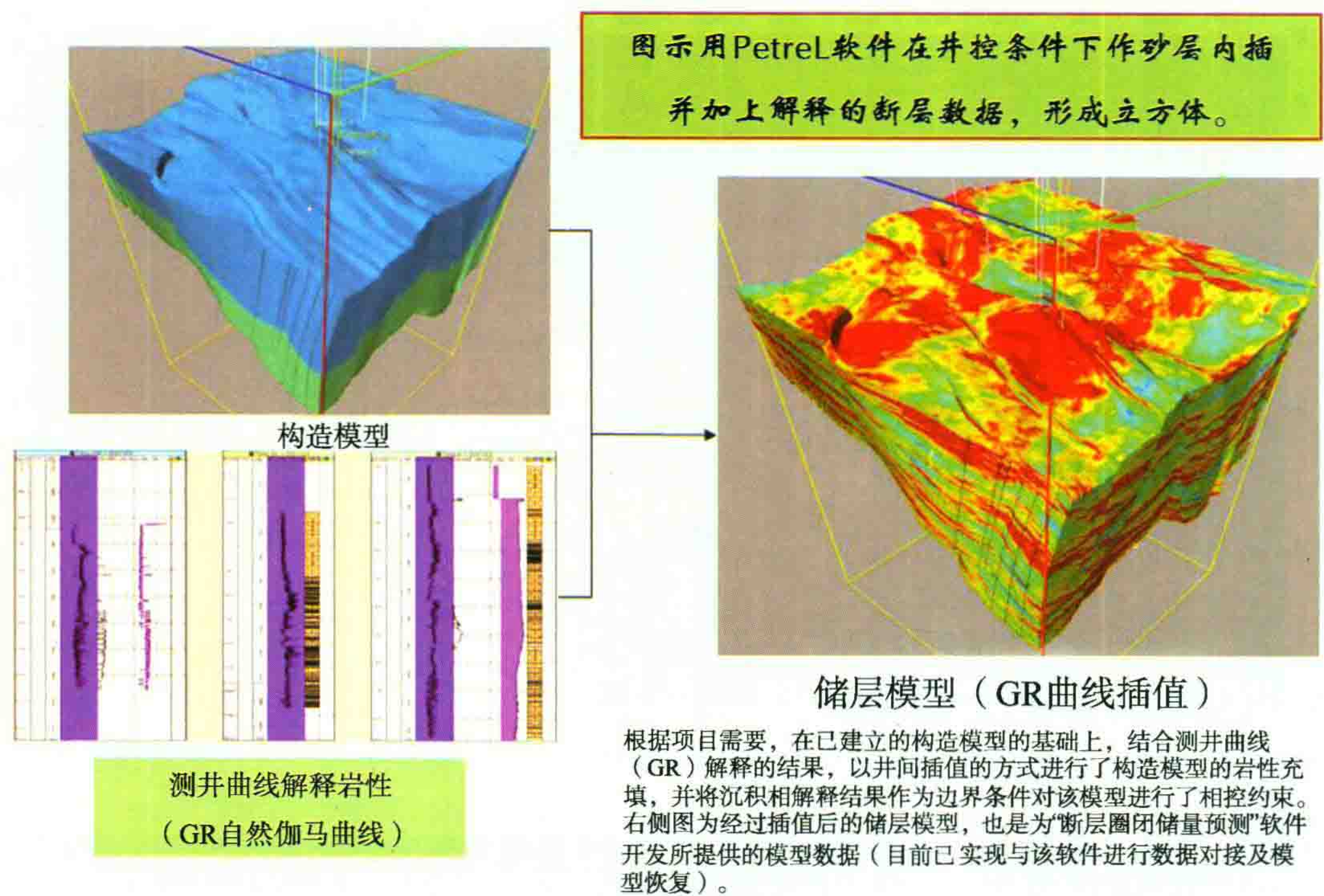


图 4 地质模型的初步建立(GR 曲线)

用通常的地震资料解释方法，对三维地震数据作过细的断层解释。从解释过的断层数据中，卸出断层文件。

再将每个断层点 x、y、z 坐标插进解释好的岩性 Cube 立方体中，给予每个断层点标上岩性指数为 4，这就完成了适合于 TRAP-3D 分析的输入数据要求。

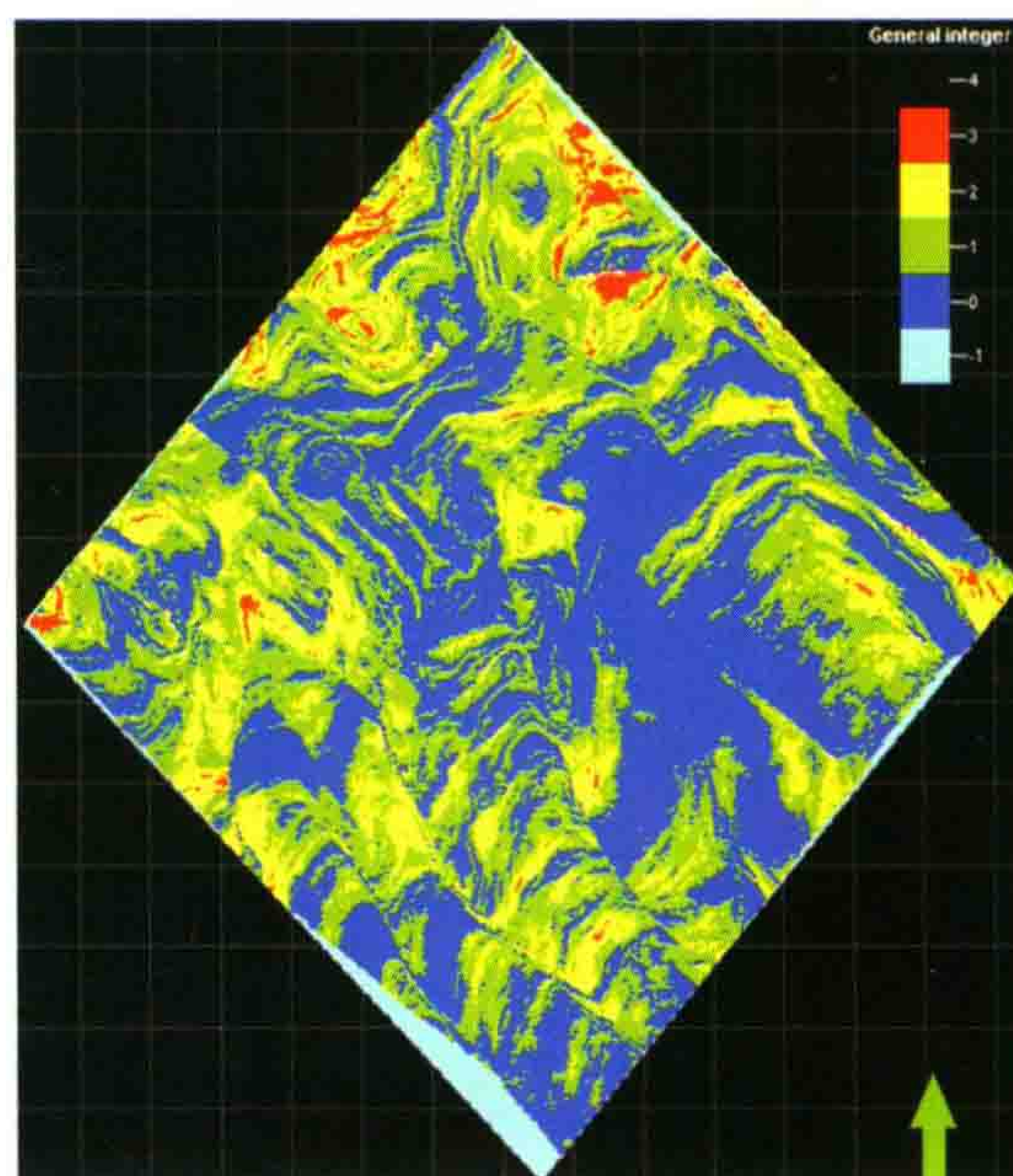
立方体的图像大致如图 4 所示。

在建立模型的过程中还利用 SEGY 数据体转换模块进行数据体转换，利用断层加载模块进行断层加载。数据体转换情况见图 5，断层加载情况见图 6 和图 7。

断层加载模块主要用于将插值后的各断层文件加载进 SEG 格式岩性体，并将各深度切片输出为单独文件，以满足"TRAP-3D"软件对输入岩性数据文件的要求，为该软件的顺利运行做好最终的输入数据准备工作。

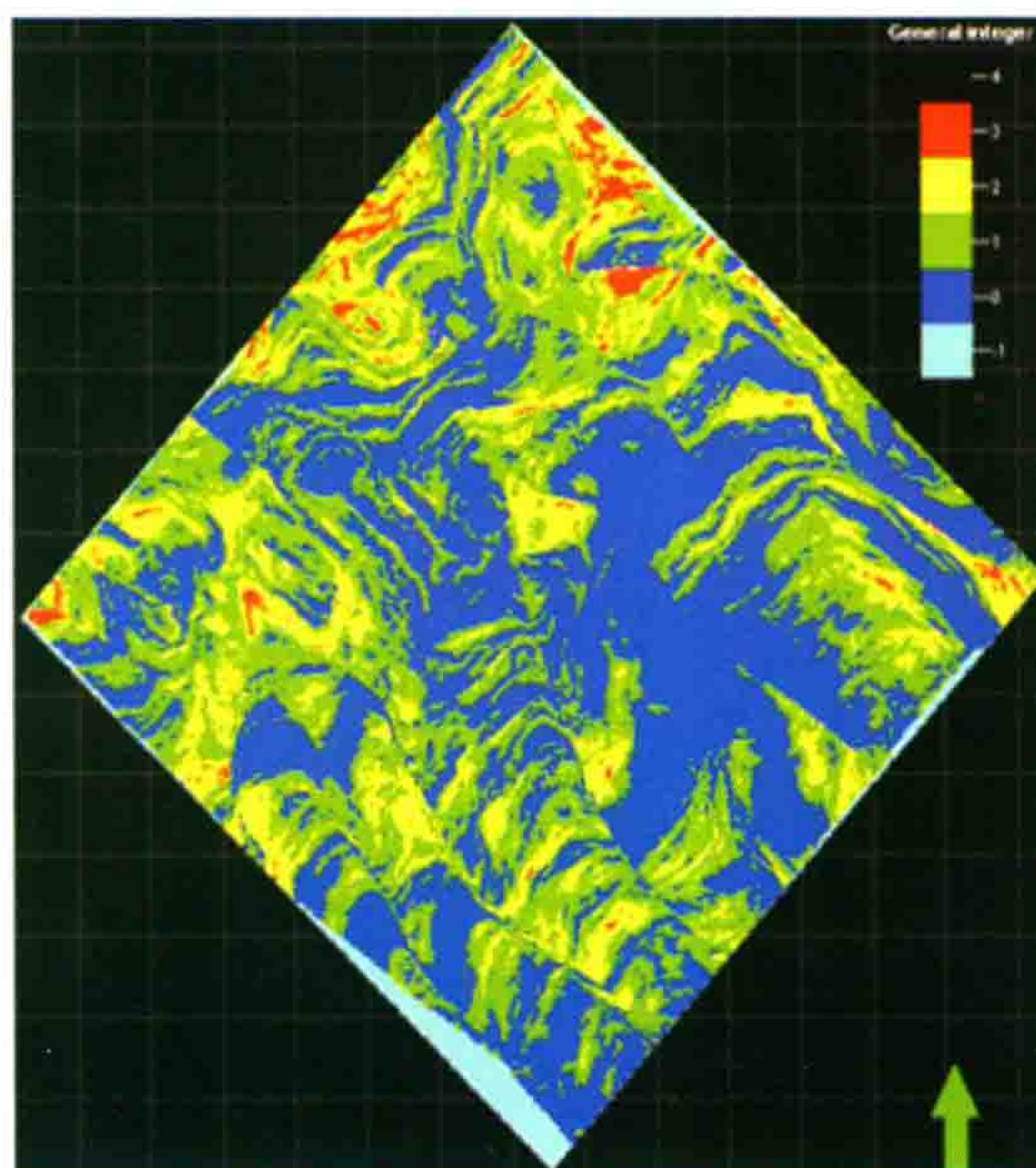


原岩性切片（深度1430 m）色标由浅蓝色至黄色表示伽马值由小到大。

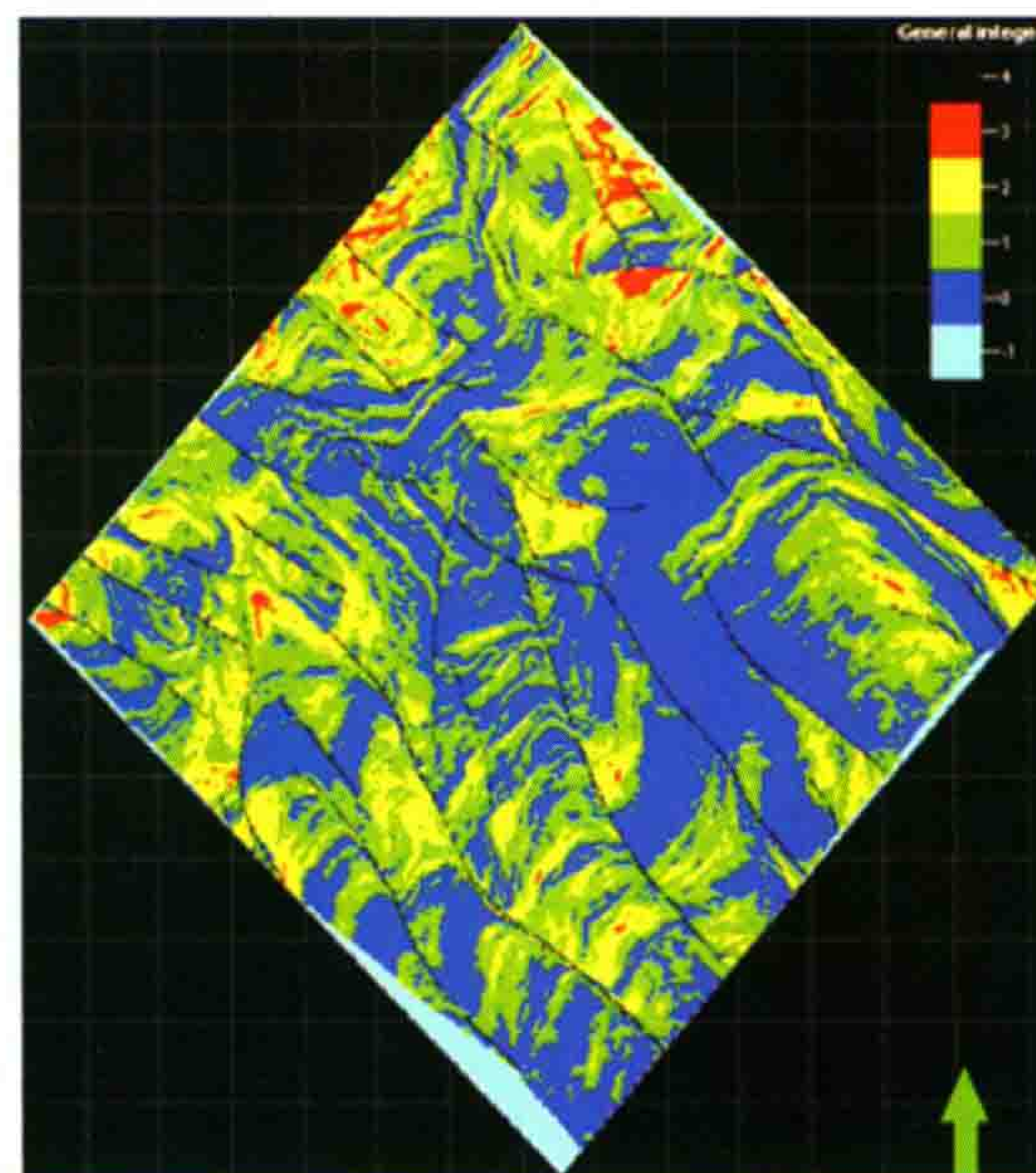


转换后岩性体剖面（深度1430 m）深蓝色为泥岩，绿色为粉砂岩，黄色为中砂岩，红色为好砂岩。

图 5　应用 SEGY 数据体转换模块进行数据体转换



断层加载前岩性体切片（深度1430 m）



断层加载后岩性体切片（深度1430 m）

深蓝色为泥岩，绿色为粉砂岩，黄色为中砂岩，红色为好砂岩，黑色为断层。

图 6　切片应用断层加载模块进行断层加载

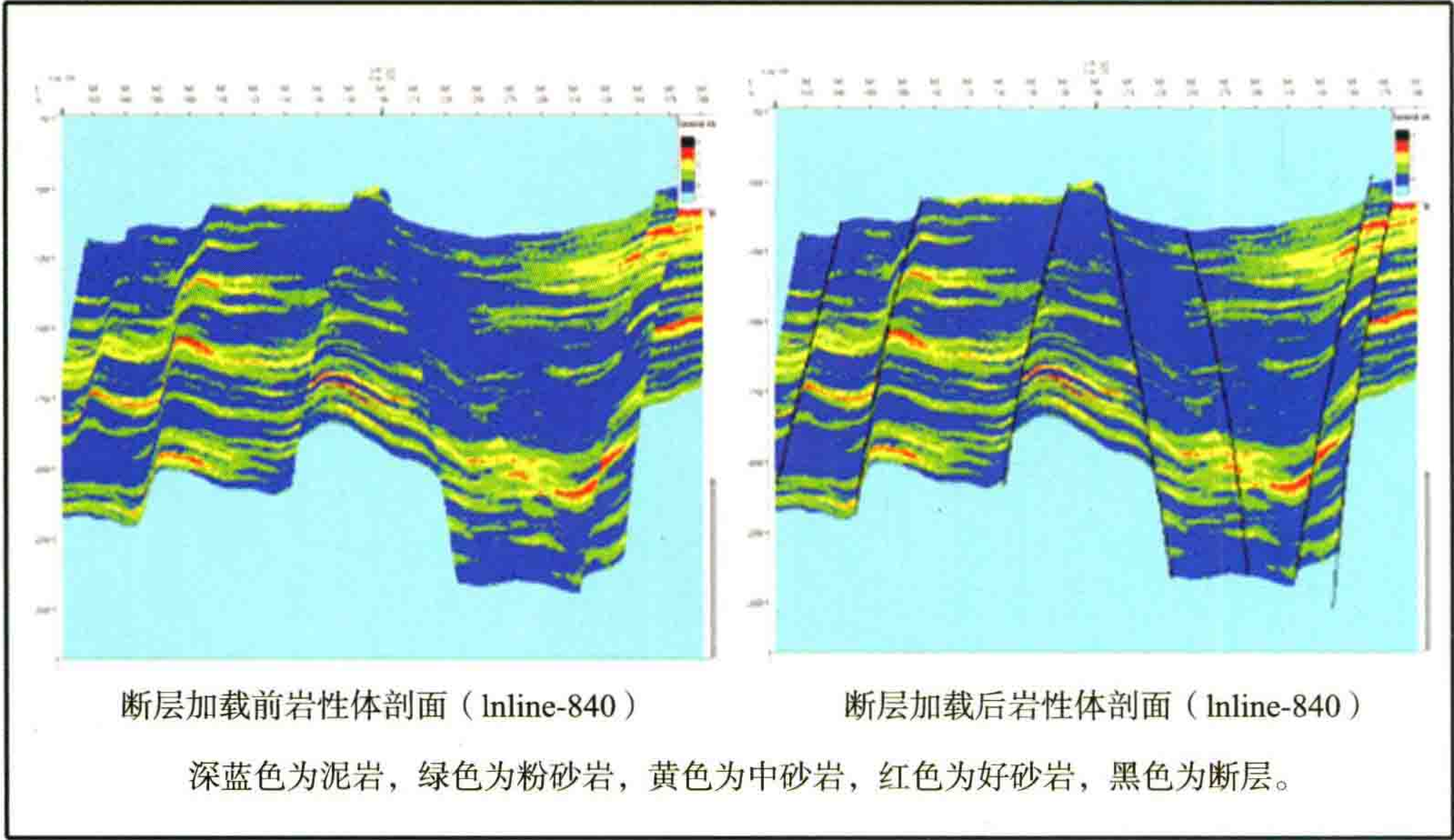


图 7　剖面应用断层加载模块进行断层加载

二、TN 油田实际数据 TRAP-3D 试算结果

图 8 中右图所示是 1300～1850 m 立方体经过 TRAP-3D 分析后 104 个切片的综合“甜点图”(Sweet Spot)。左边是最后 104 切片的岩性指数分布图。

图 9 左边为经过打探井钻探后，甲方认为的含油范围，如左图中红色区域。此左图仅仅是人们对断块油田含油范围的概念性粗略表达，并没有圈闭量的含义。他们认为是断块油田。右边是我们经过 TRAP-3D 分析所得的“甜点图”。“甜点图”中红色、粉红色和黄色的区域是圈闭量较大的。我用红色曲线勾画出一个区来。

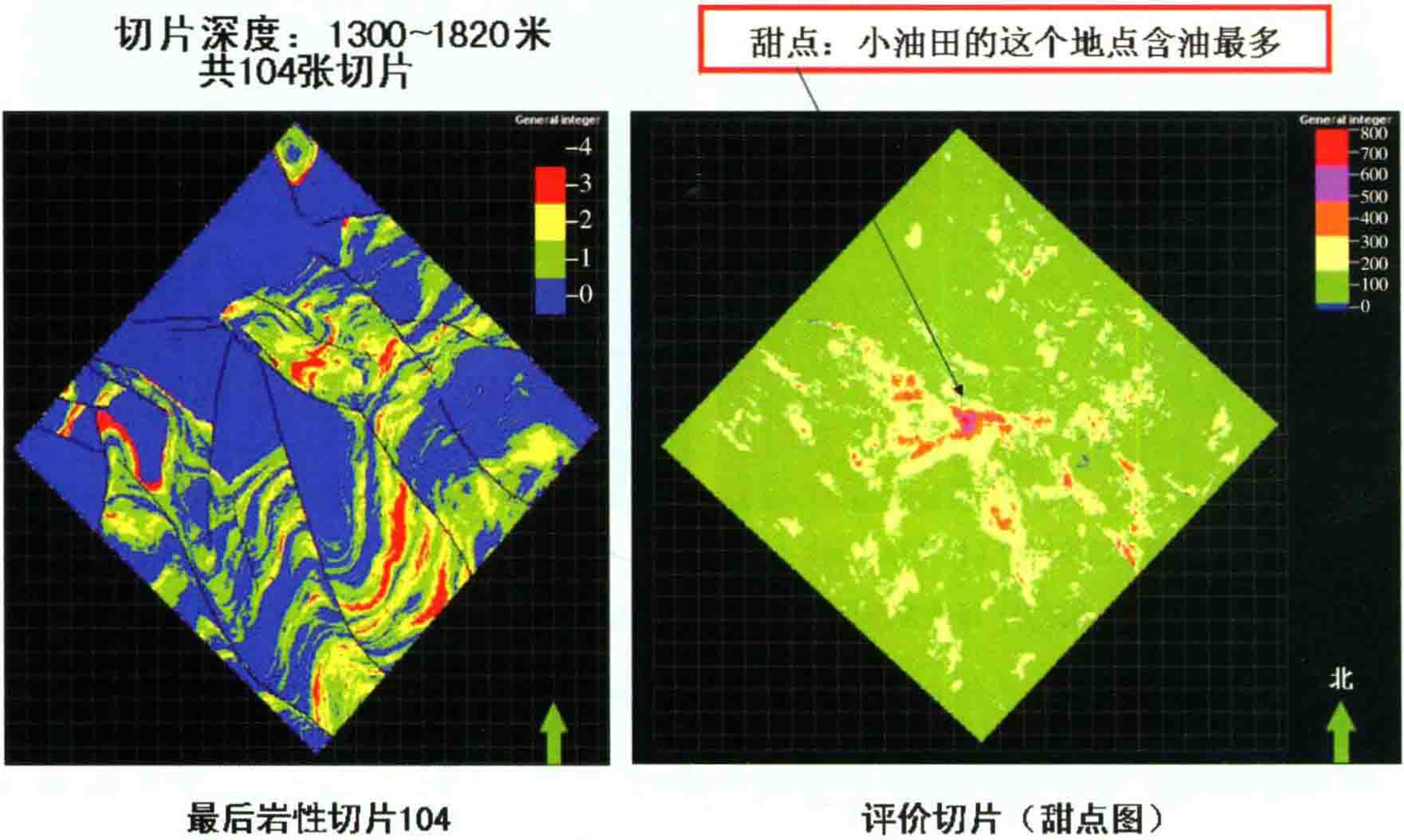


图 8　最后 104 张切片的岩性指数分布图(左)和综合“甜点图”

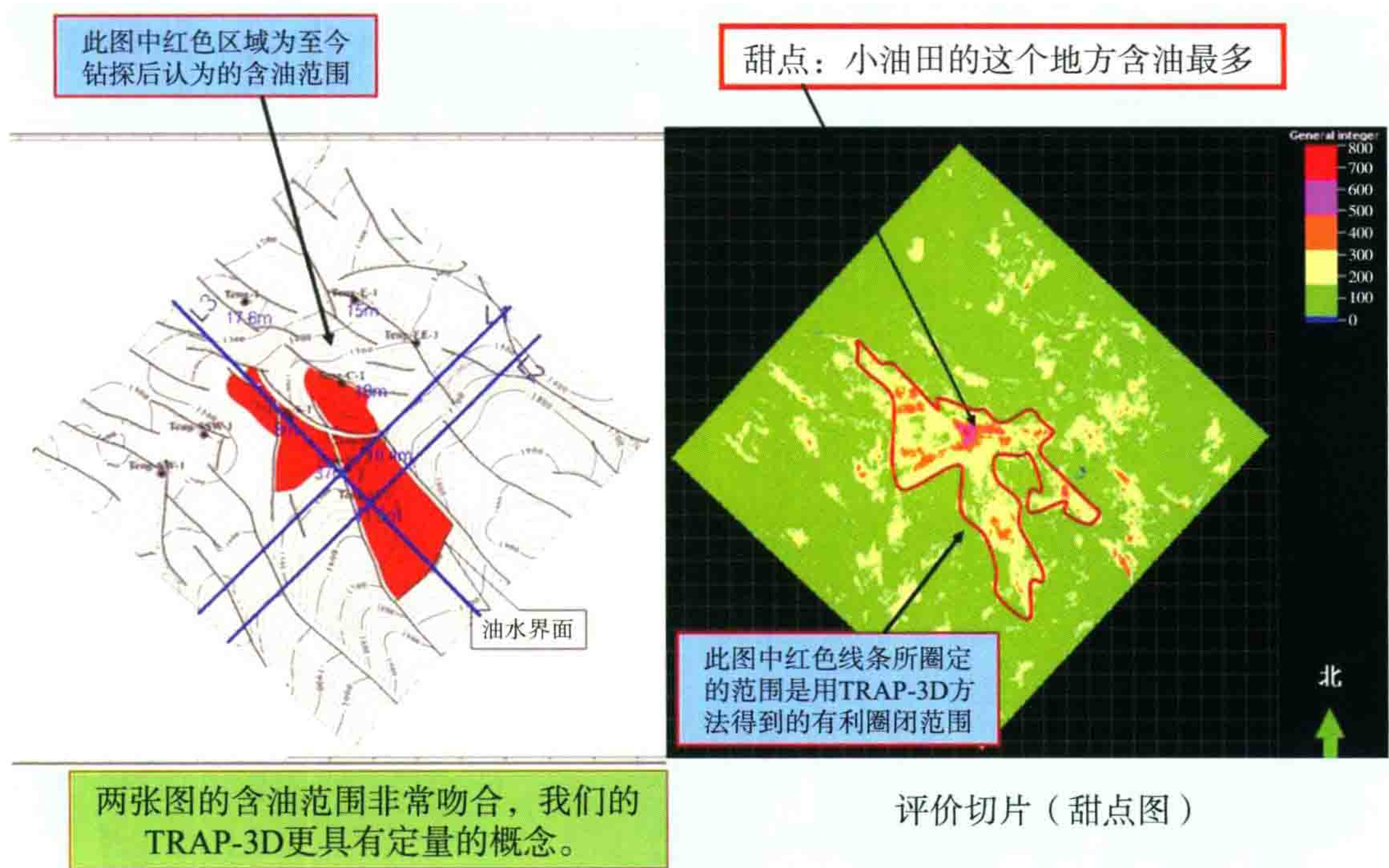


图 9 钻探后确定的含油范围和 TRAP-3D 分析"甜点图"比较

它与左边红色区域基本相当，而且是更准确。

TRAP-3D 分析的已经是具有定量的概念，而且它包括了岩性圈闭及背斜构造圈闭，这从以下的一系列图幅中可以看到它的优越性。

图 10 为剖面分析图例，从中可以看到剖面中标出了断层封闭的圈闭，及岩性圈闭的例子。

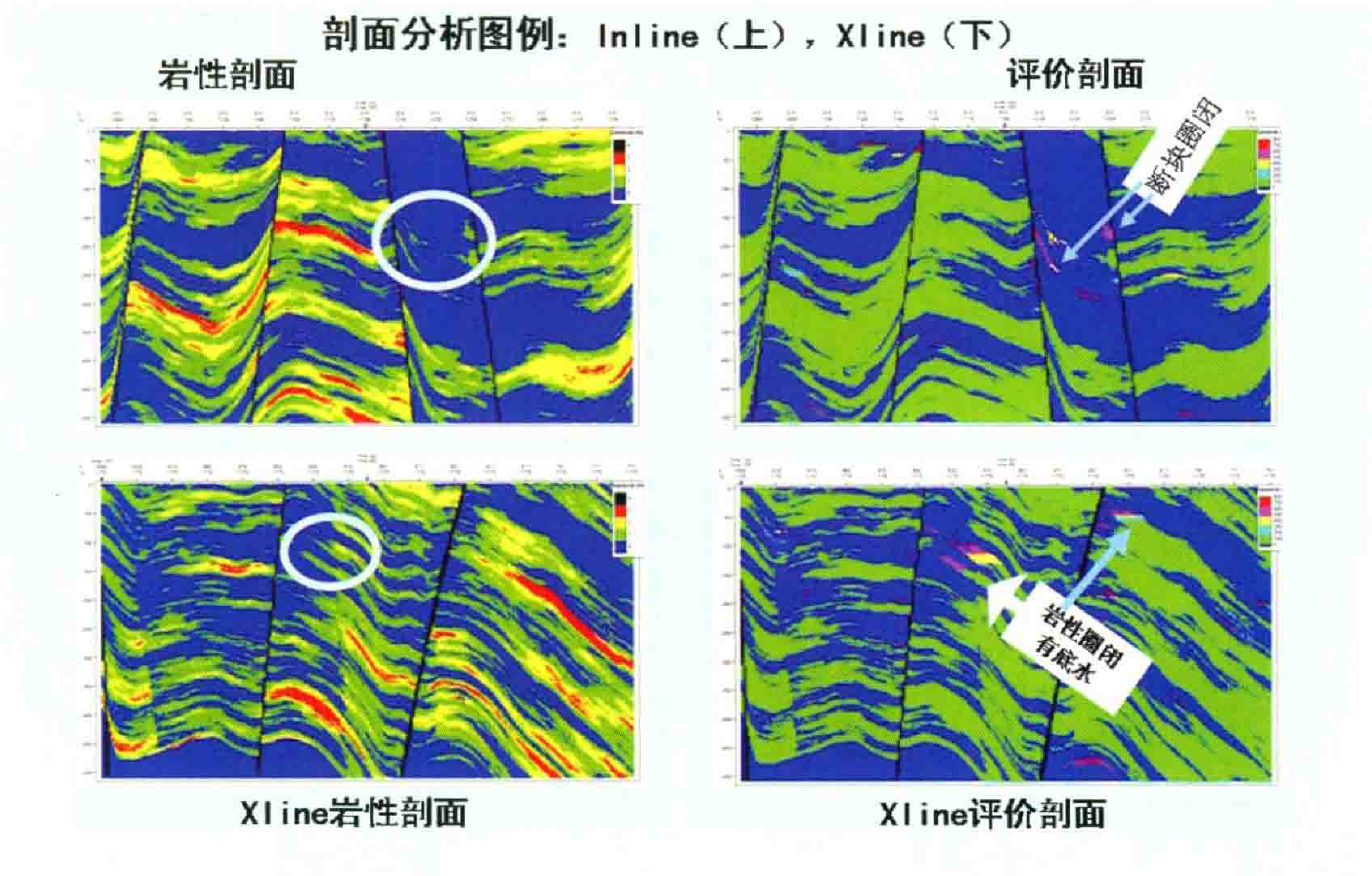


图 10 剖面分析图例

我们的图幅采取左、右两图的对比方式。

左边是岩性指数切片，红色为好砂岩 3，黄色为砂岩 2，天蓝色为粉砂 1，深蓝色为泥岩 0。断层为黑色

线条 4(后改为−16,为了显示方便)。右边是圈闭评价切片,深红色圈闭评价最高 800 分,粉红色次之 600 分,深黄色再次 400 分,天蓝色较差 200 分,绿色基本是水层,其评分小于 100 分。深蓝色是泥岩,没有评分。断层也是黑线条。

三、TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示

以下是该油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示和剖面。

每隔深度 dZ=5 m 显示 1 片,从 1300 m 第一张切片开始,共 30 张切片。中间有两图为剖面图,最后一张为最后岩性切片 104 和评价切片“甜点图”,显示见下面图 11~图 44。

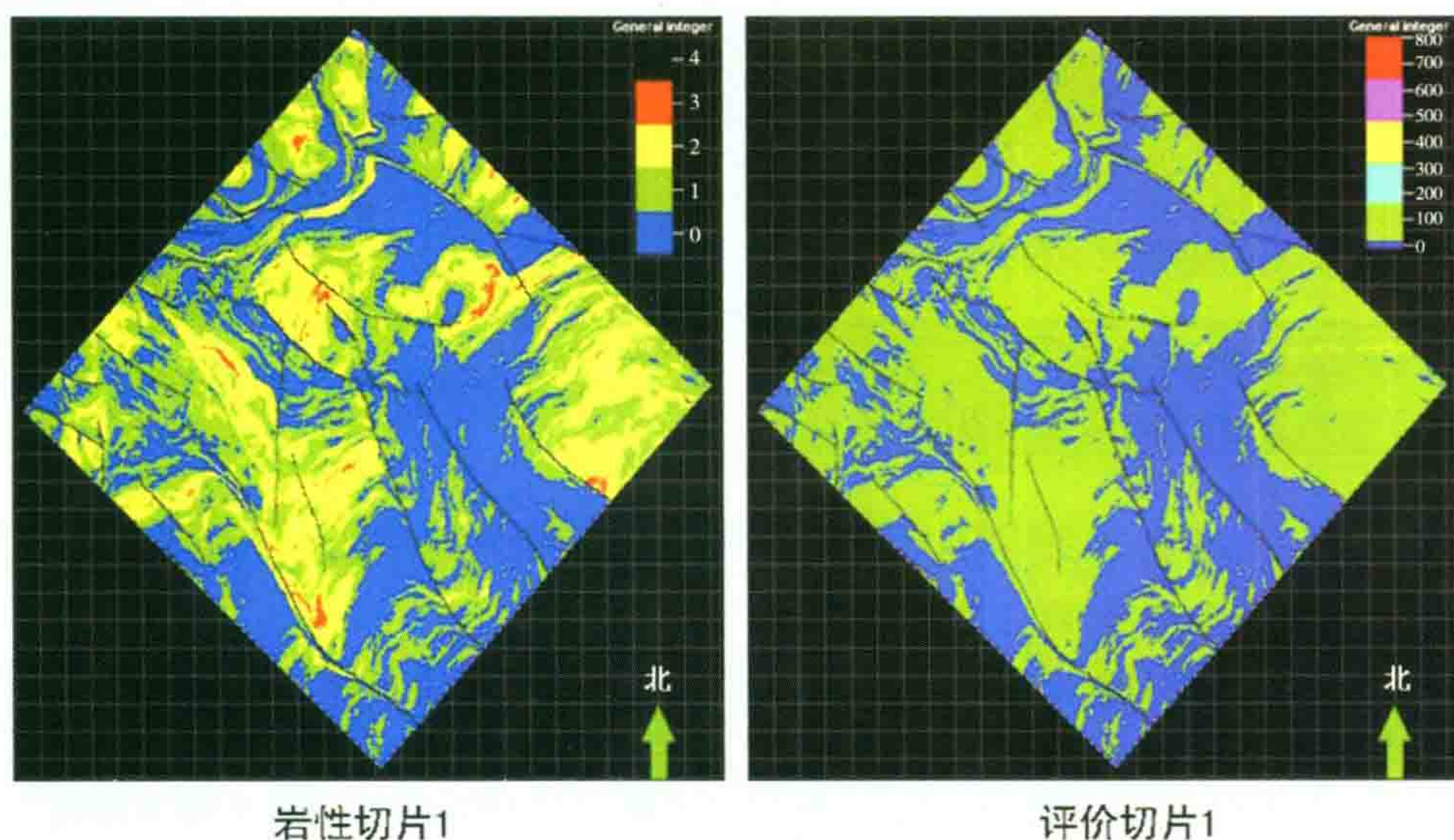


图 11 TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 1(深度 1300 m)

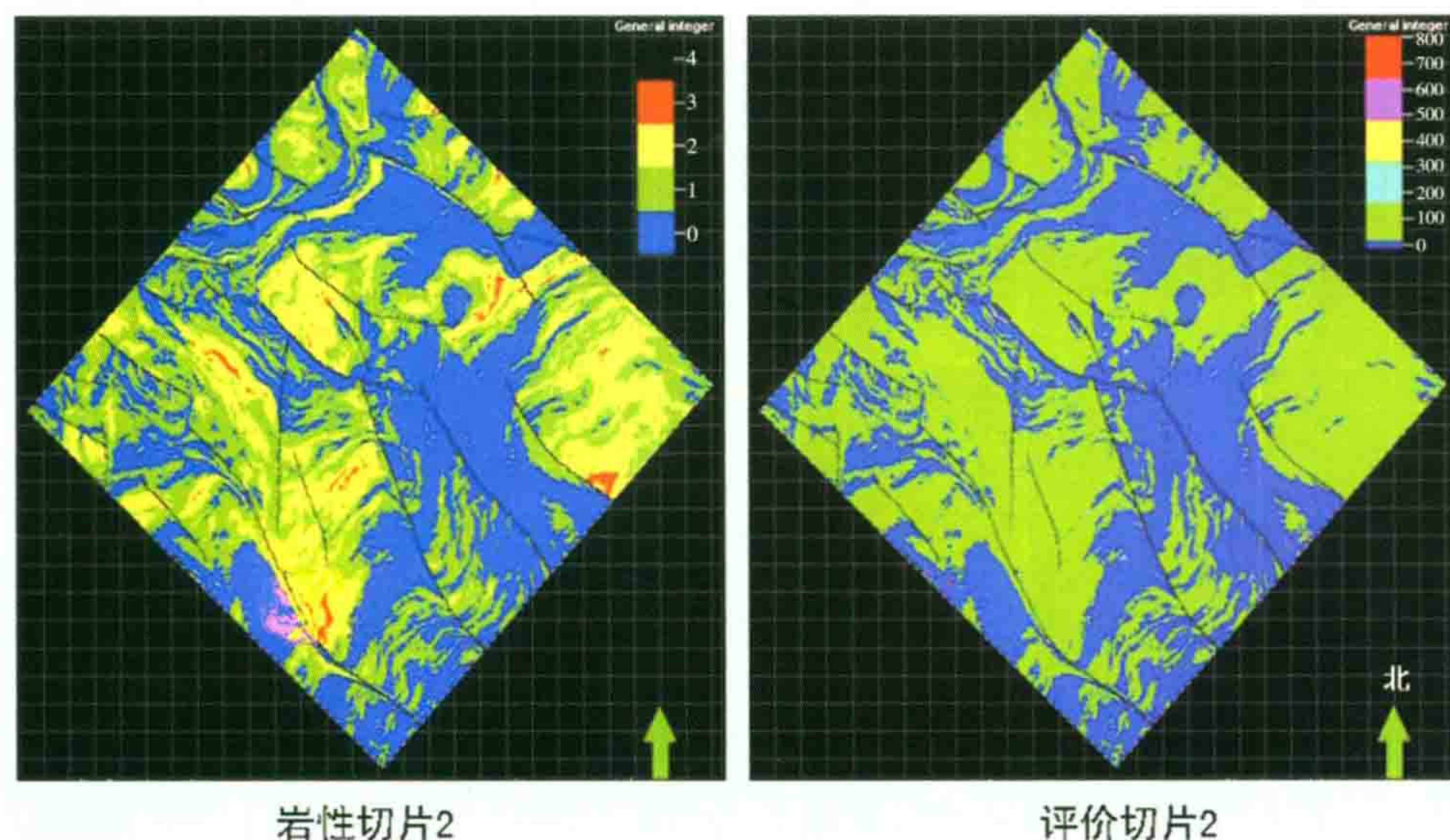


图 12 TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 2(深度 1305 m)

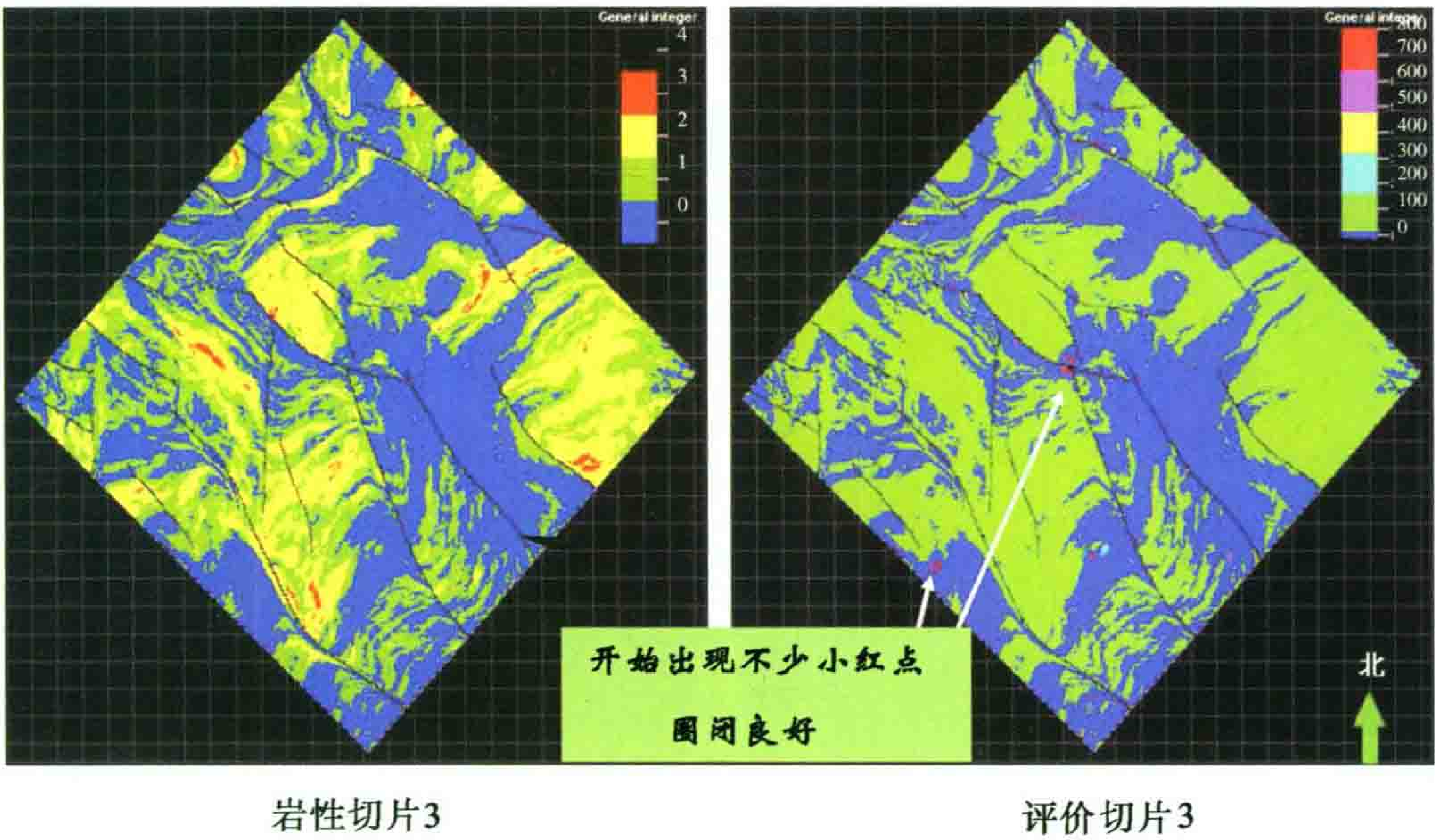


图 13　TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 3(深度 1310 m)

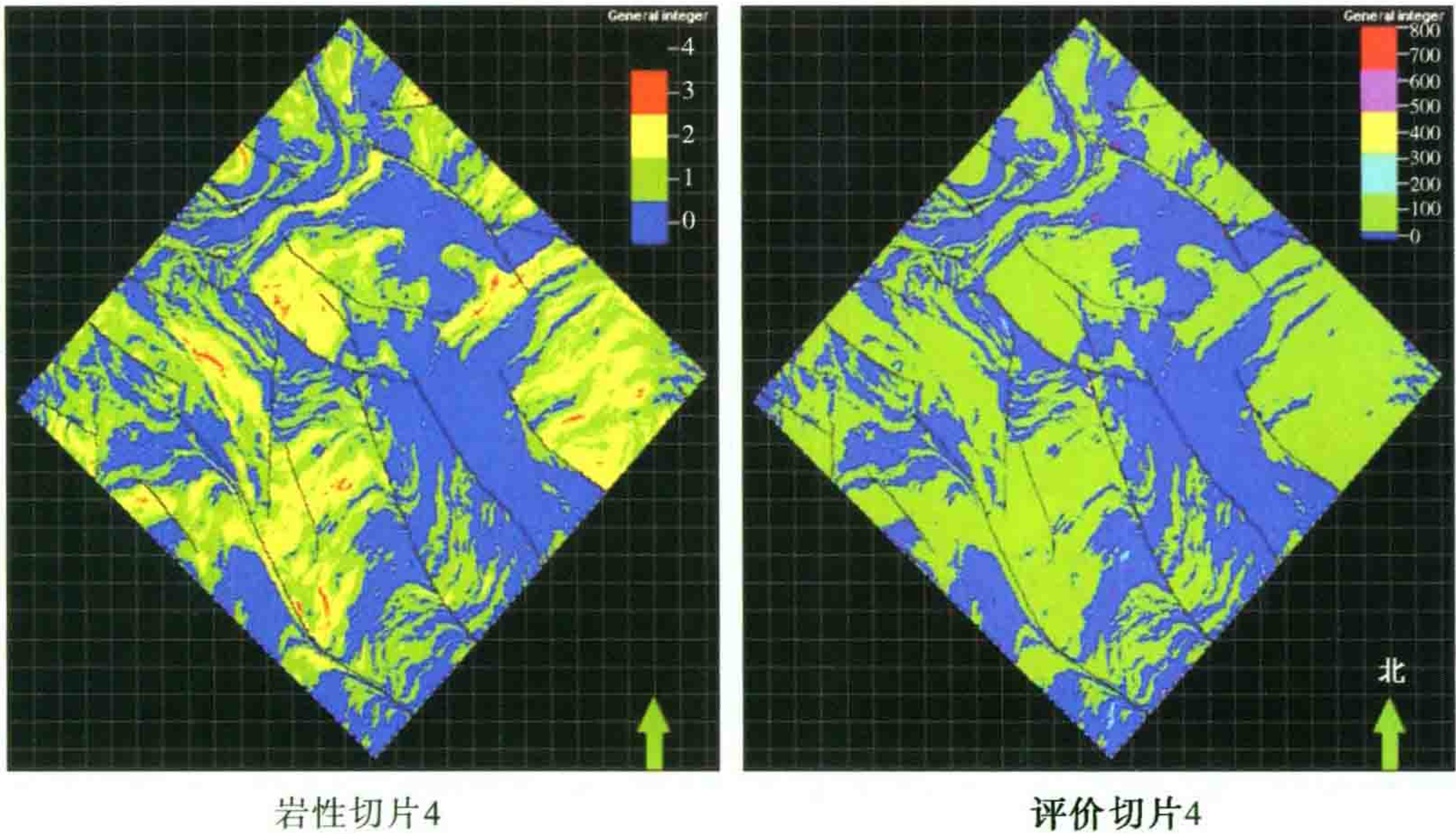
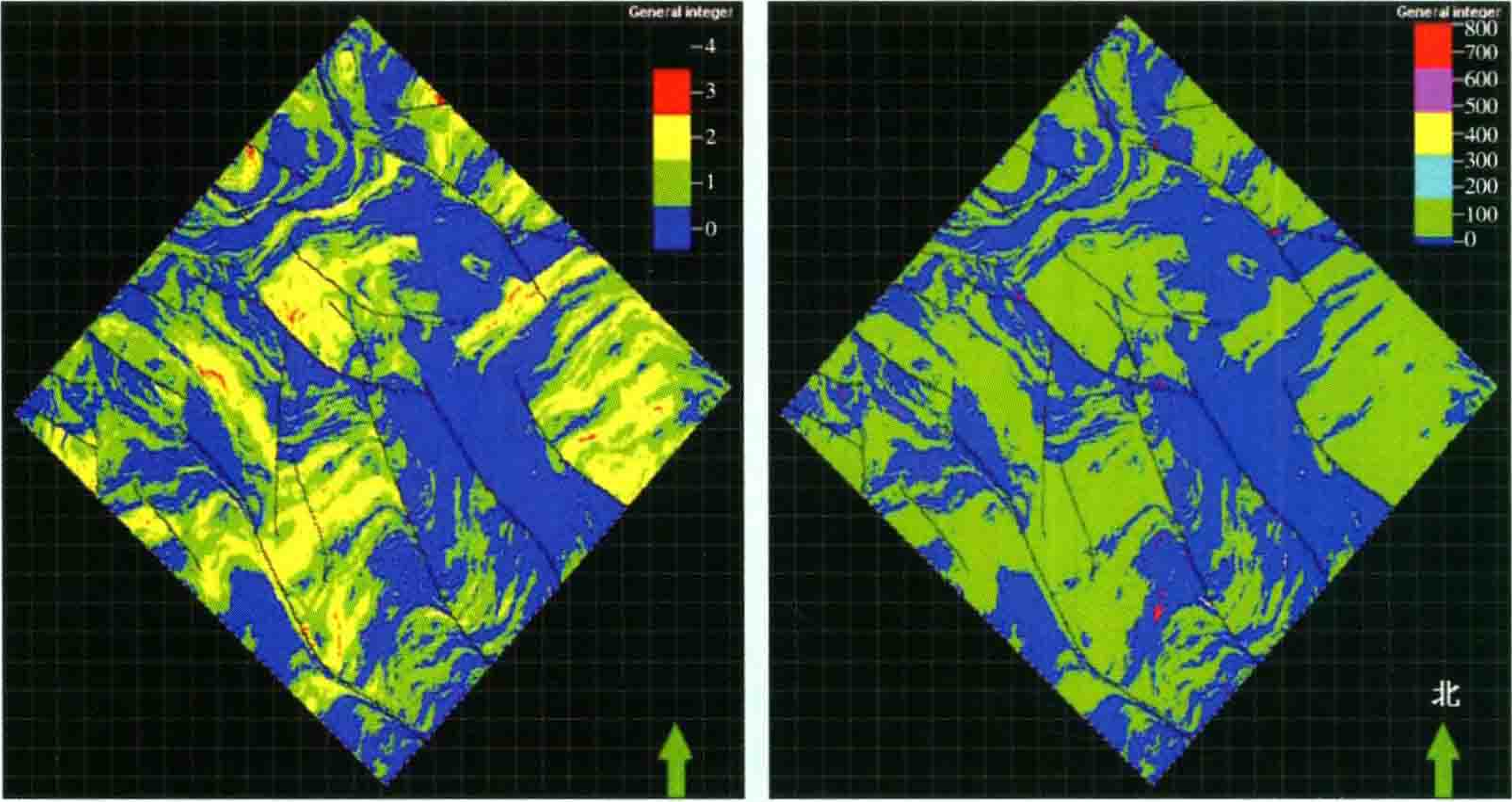
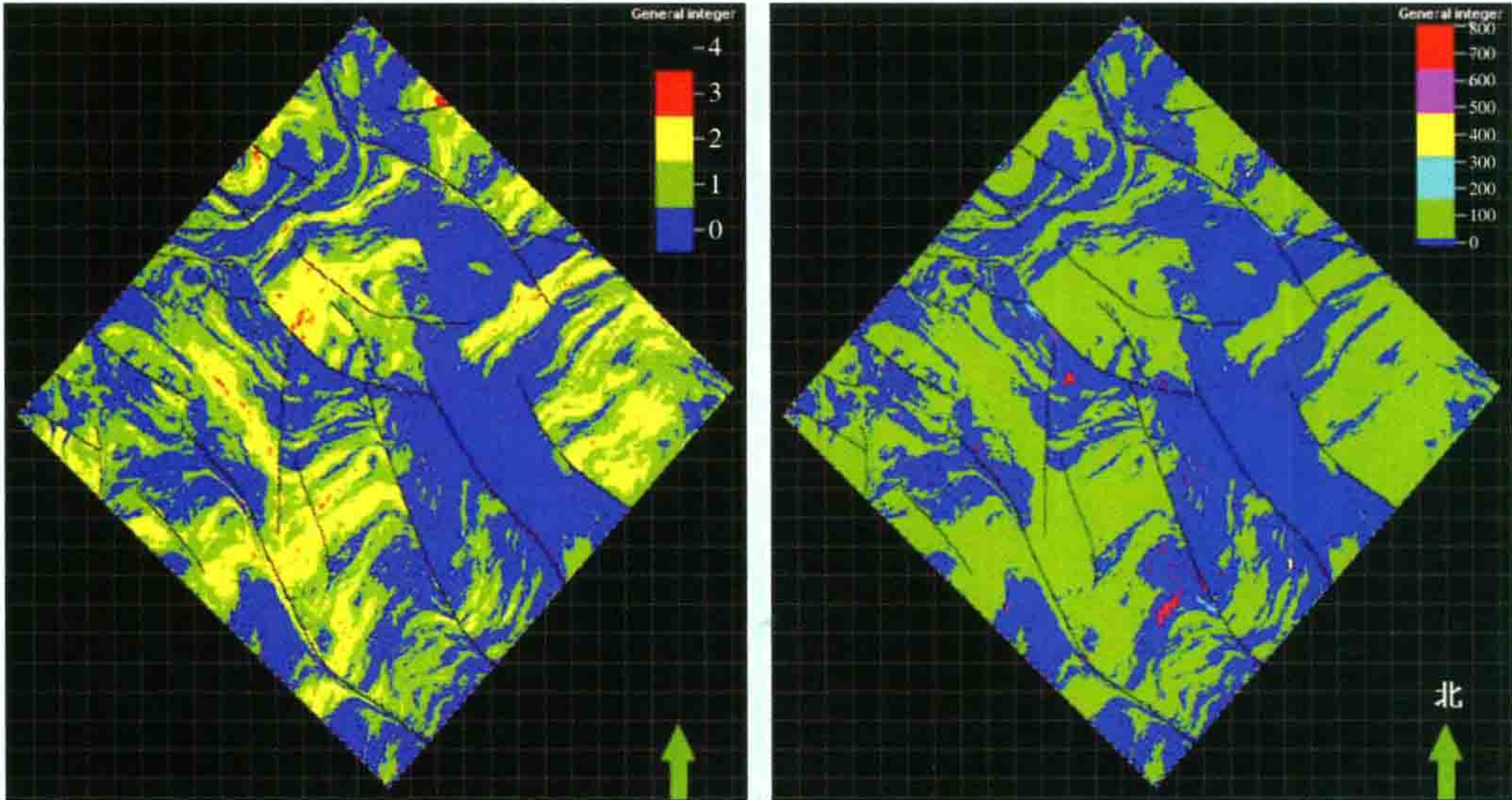


图 14　TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 4(深度 1315 m)



岩性切片5　　　　评价切片5

图 15　TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 5(深度 1320 m)



岩性切片6　　　　评价切片6

图 16　TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 6(深度 1325 m)

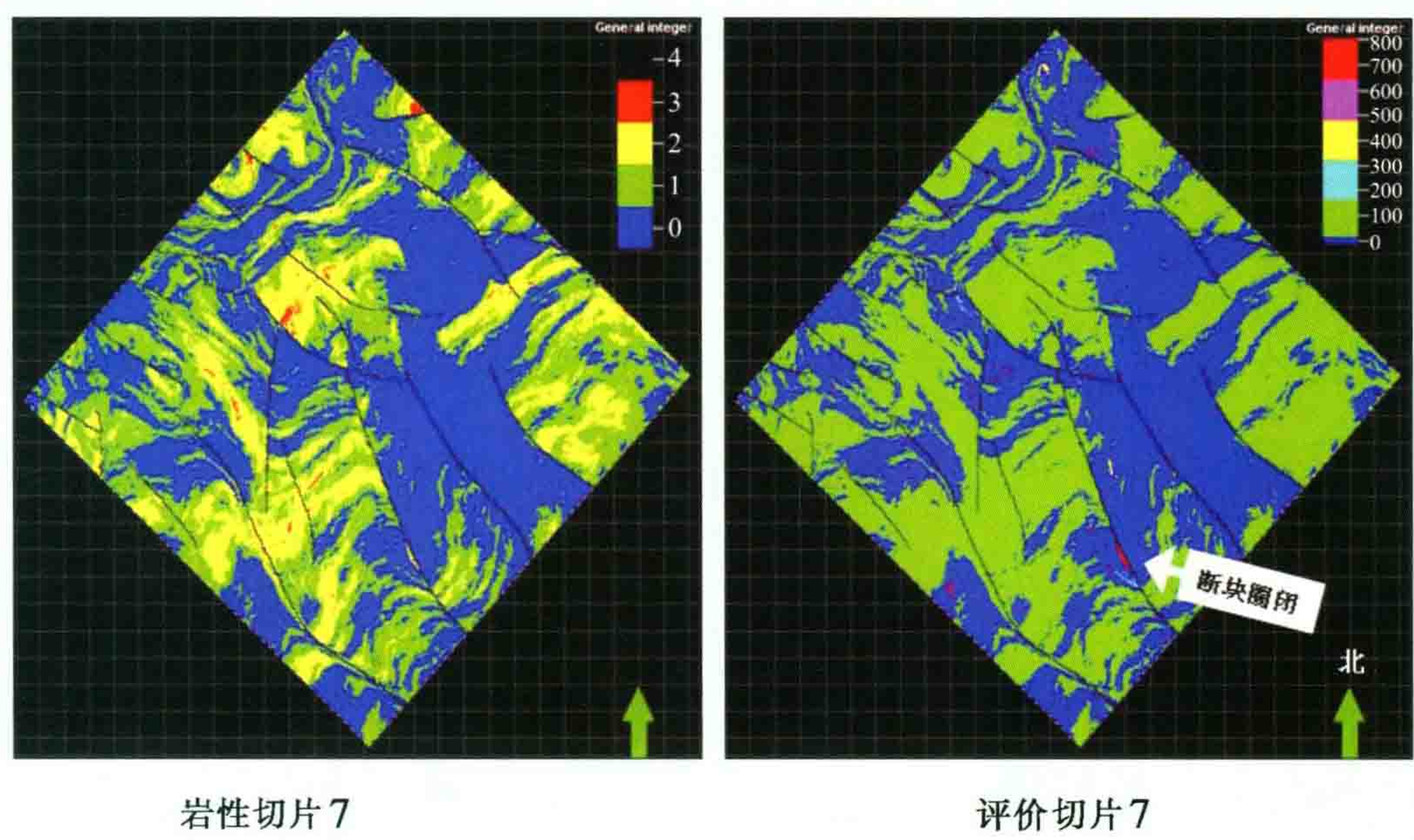


图 17　TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 7(深度 1330 m)

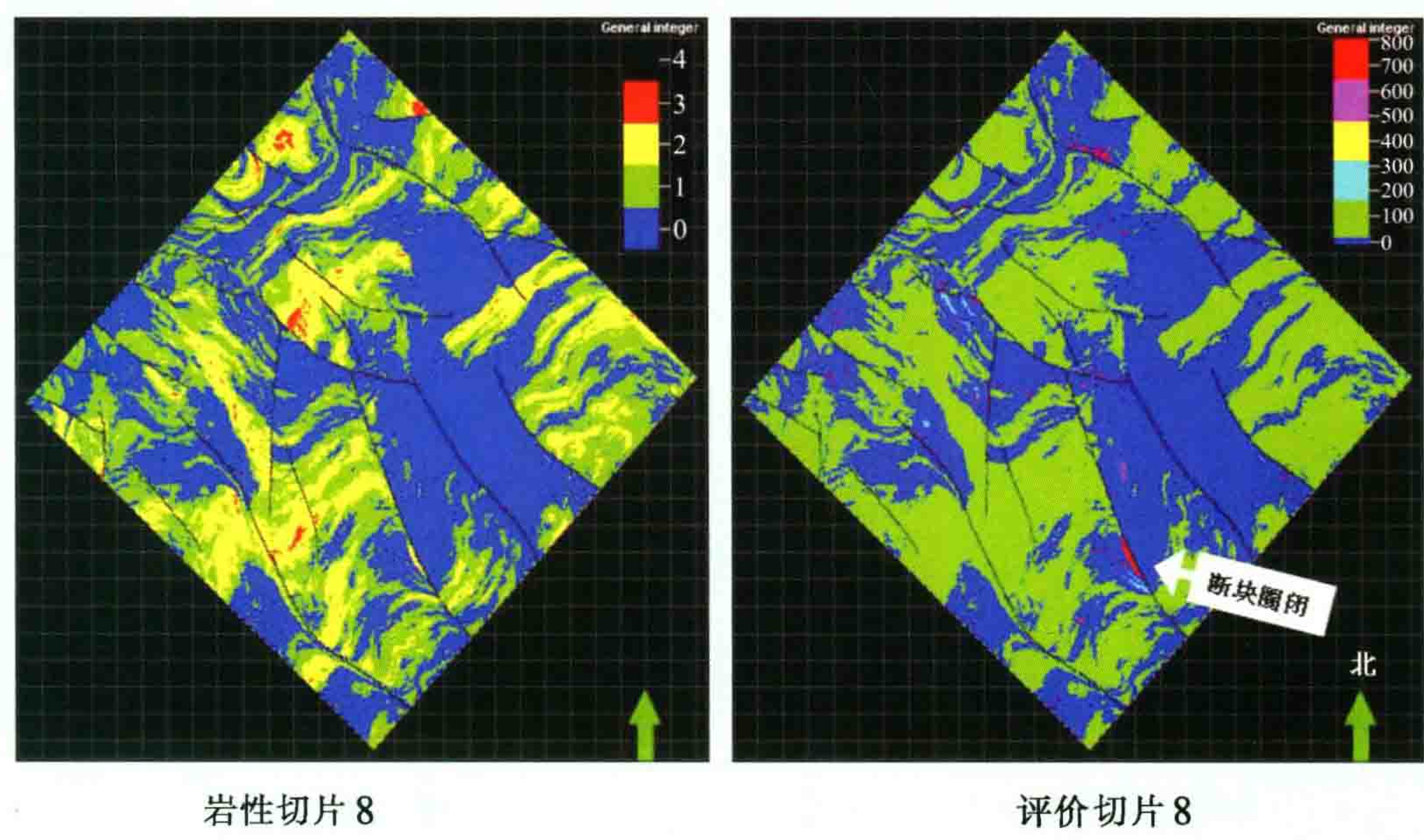


图 18　TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 8(深度 1335 m)

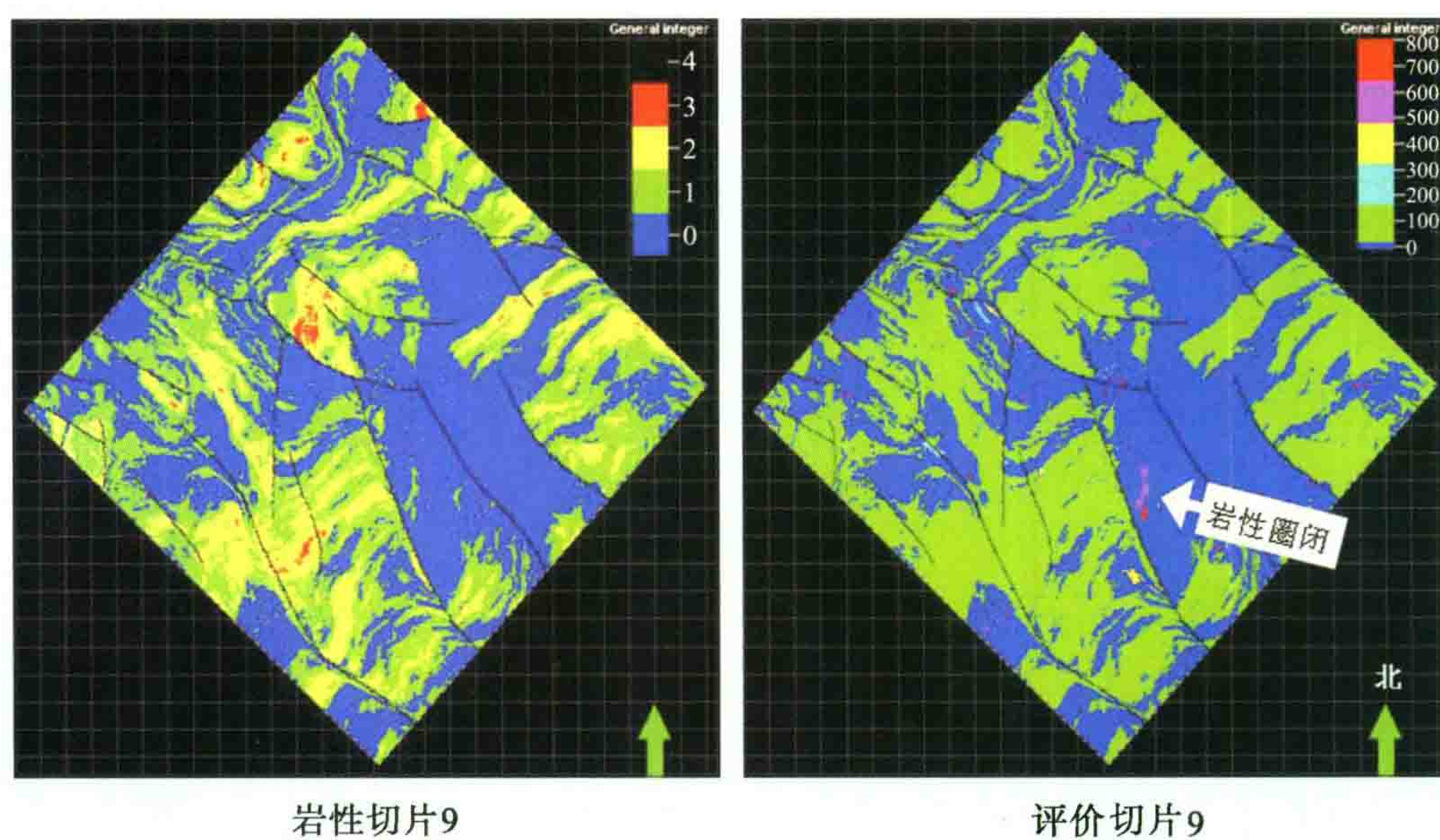


图 19 TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 9(深度 1340 m)

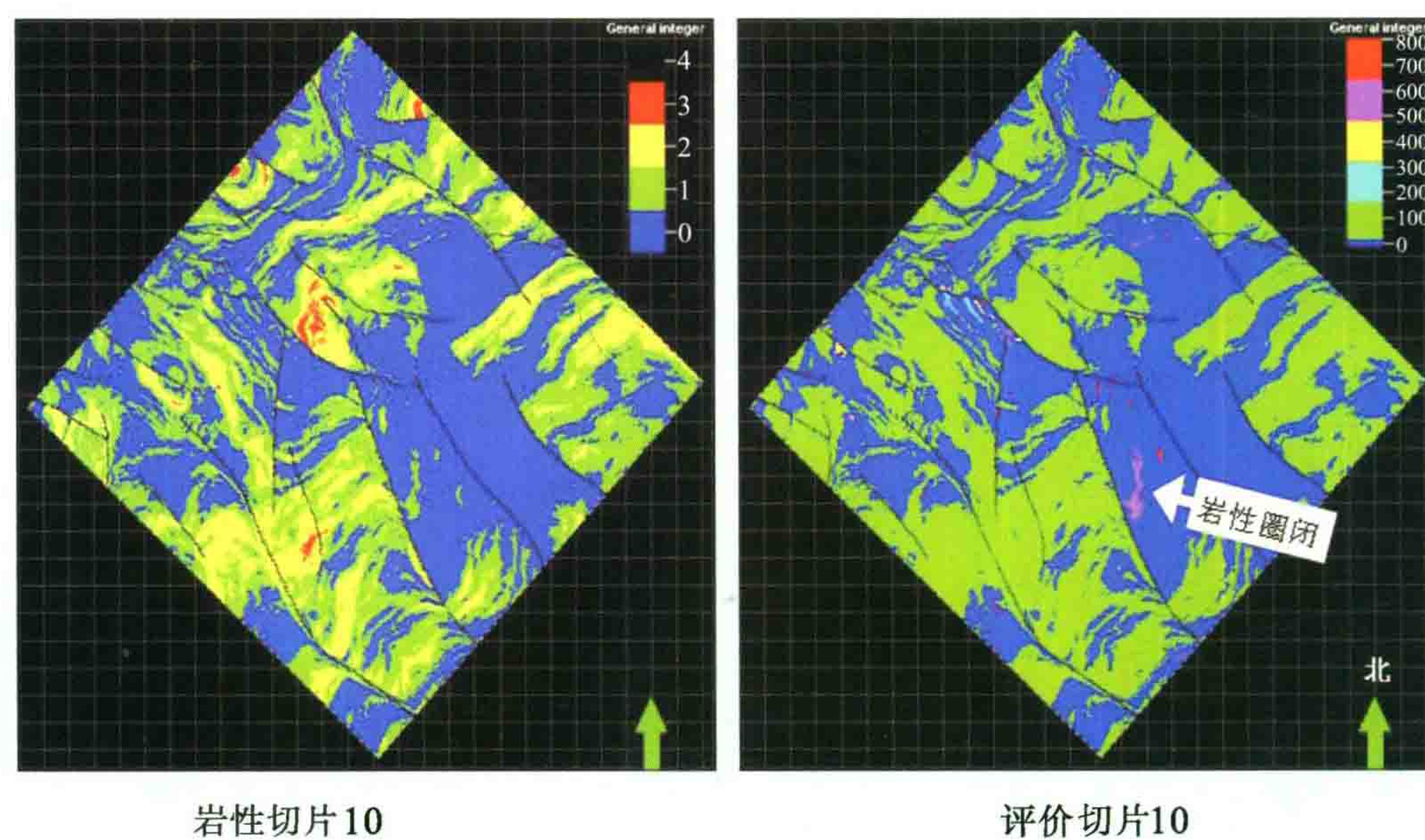


图 20 TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 10(深度 1345 m)

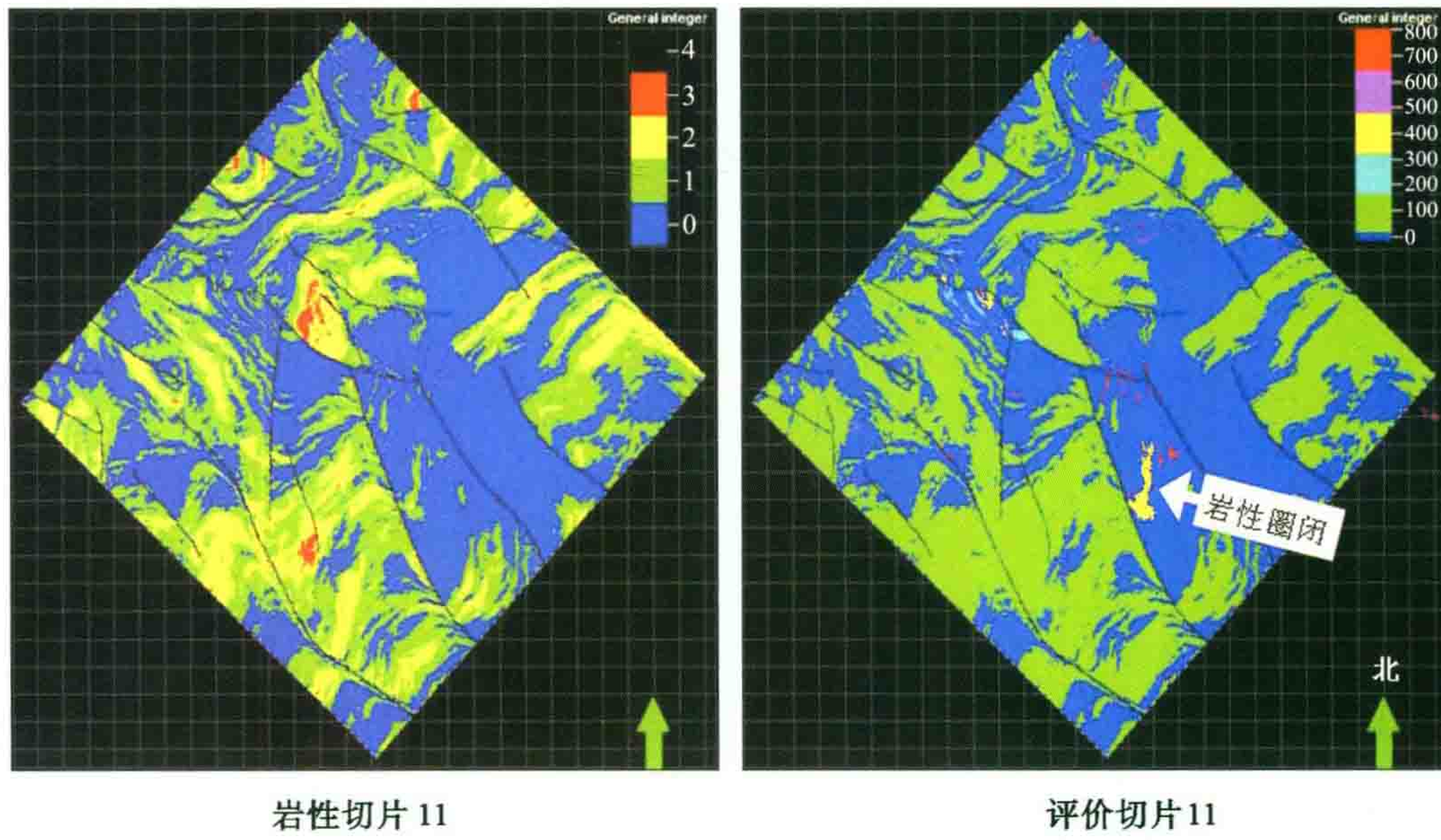


图 21　TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 11(深度 1350 m)

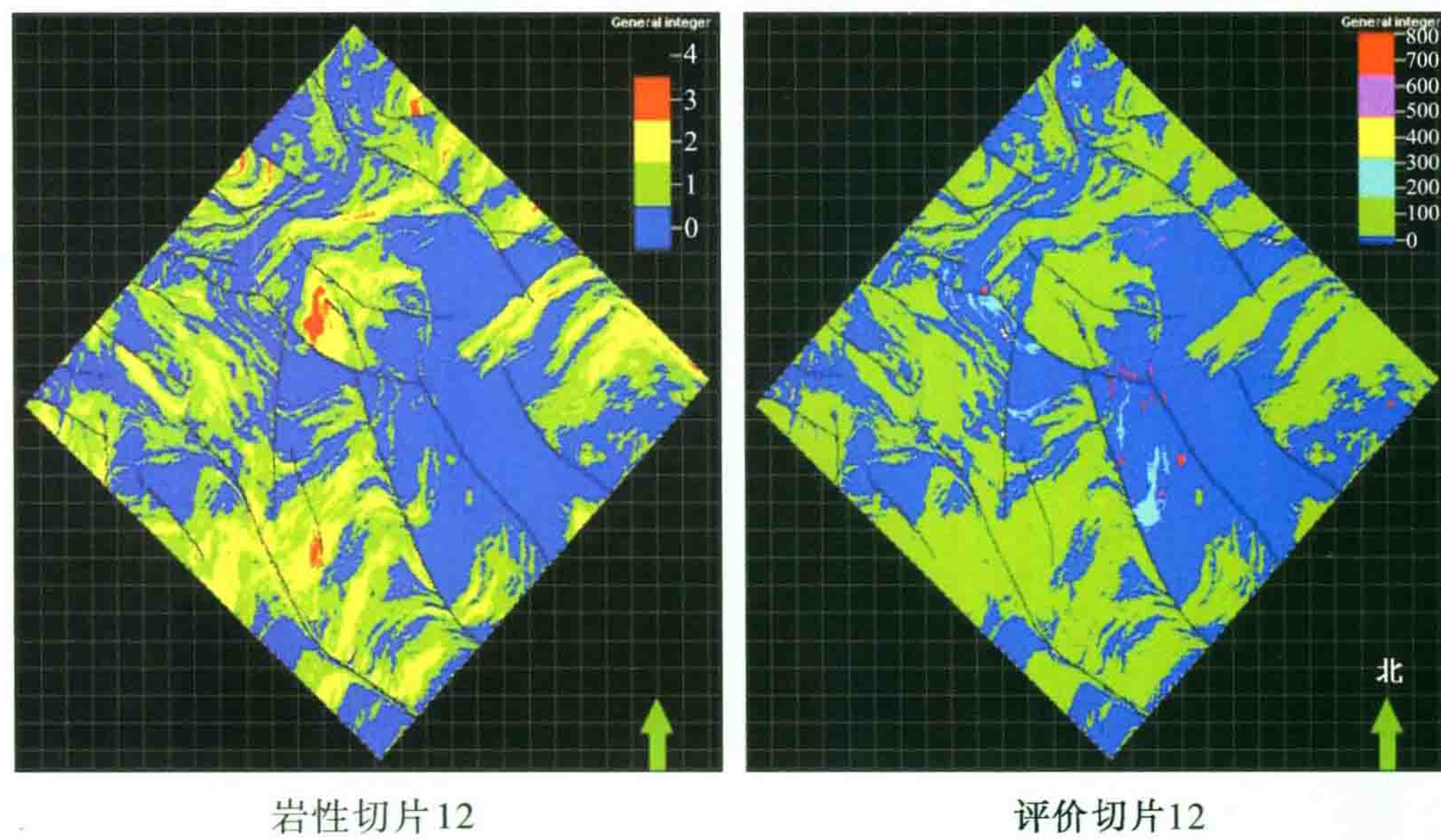
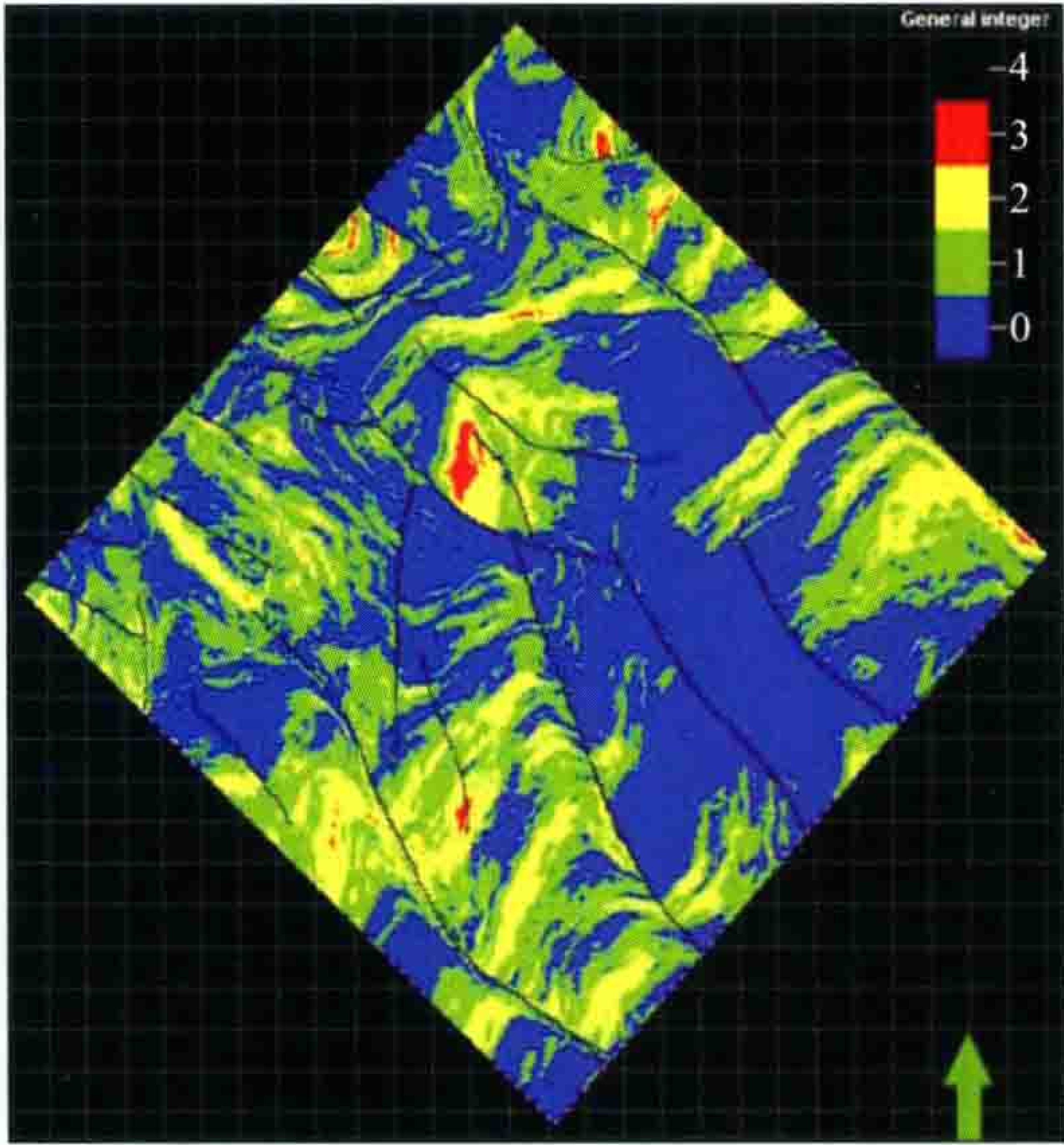
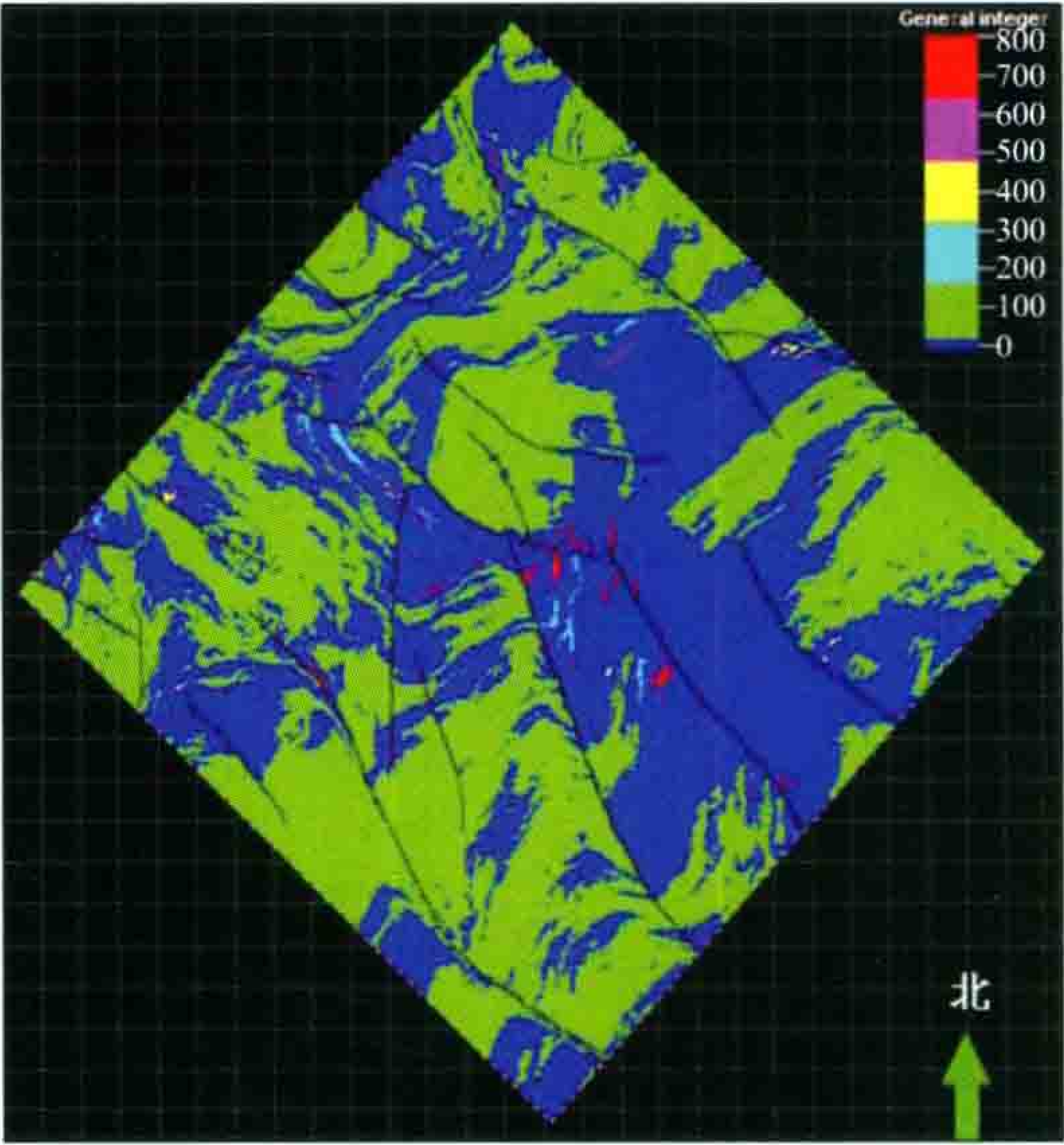


图 22　TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 12(深度 1355 m)

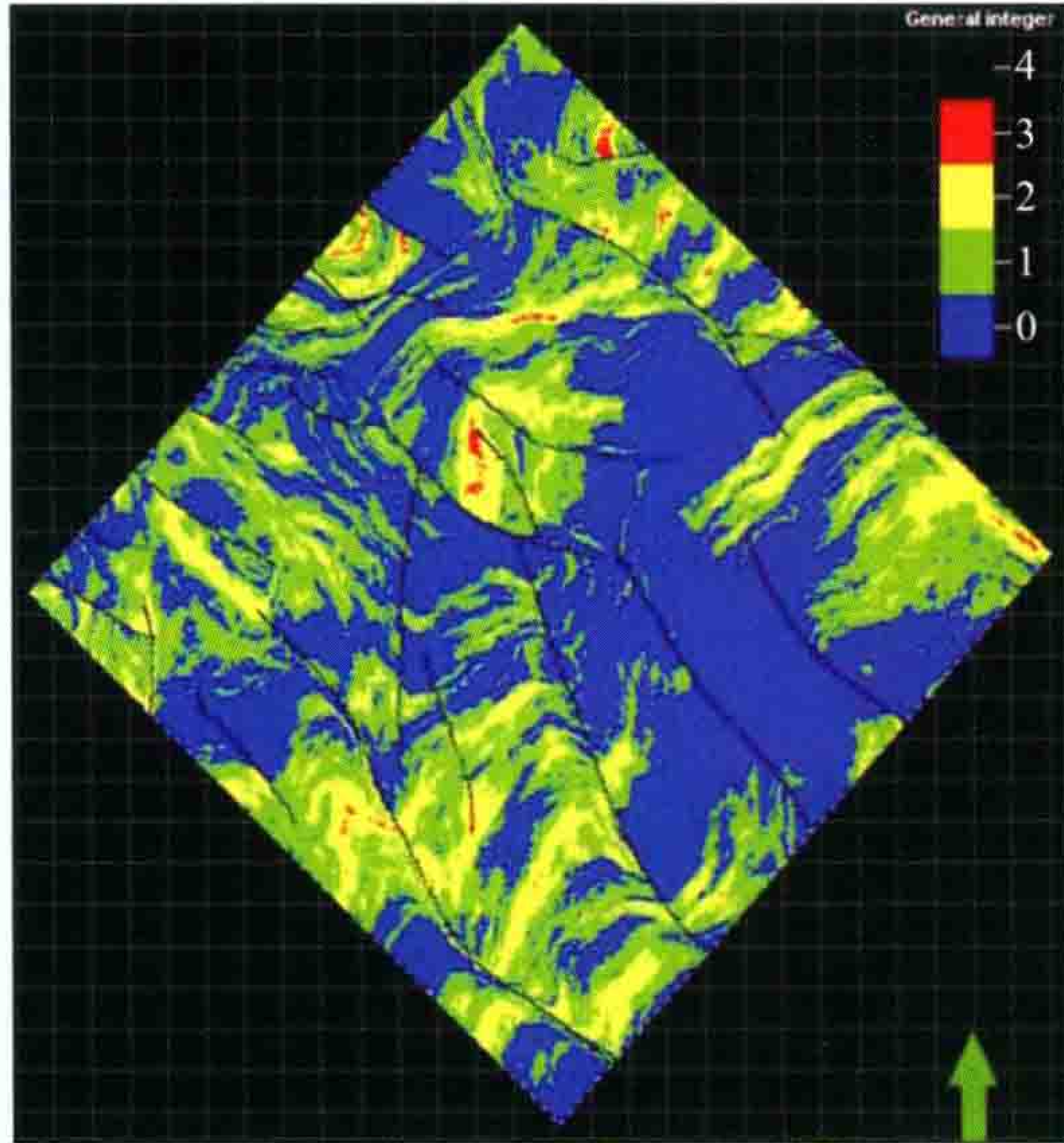


岩性切片13

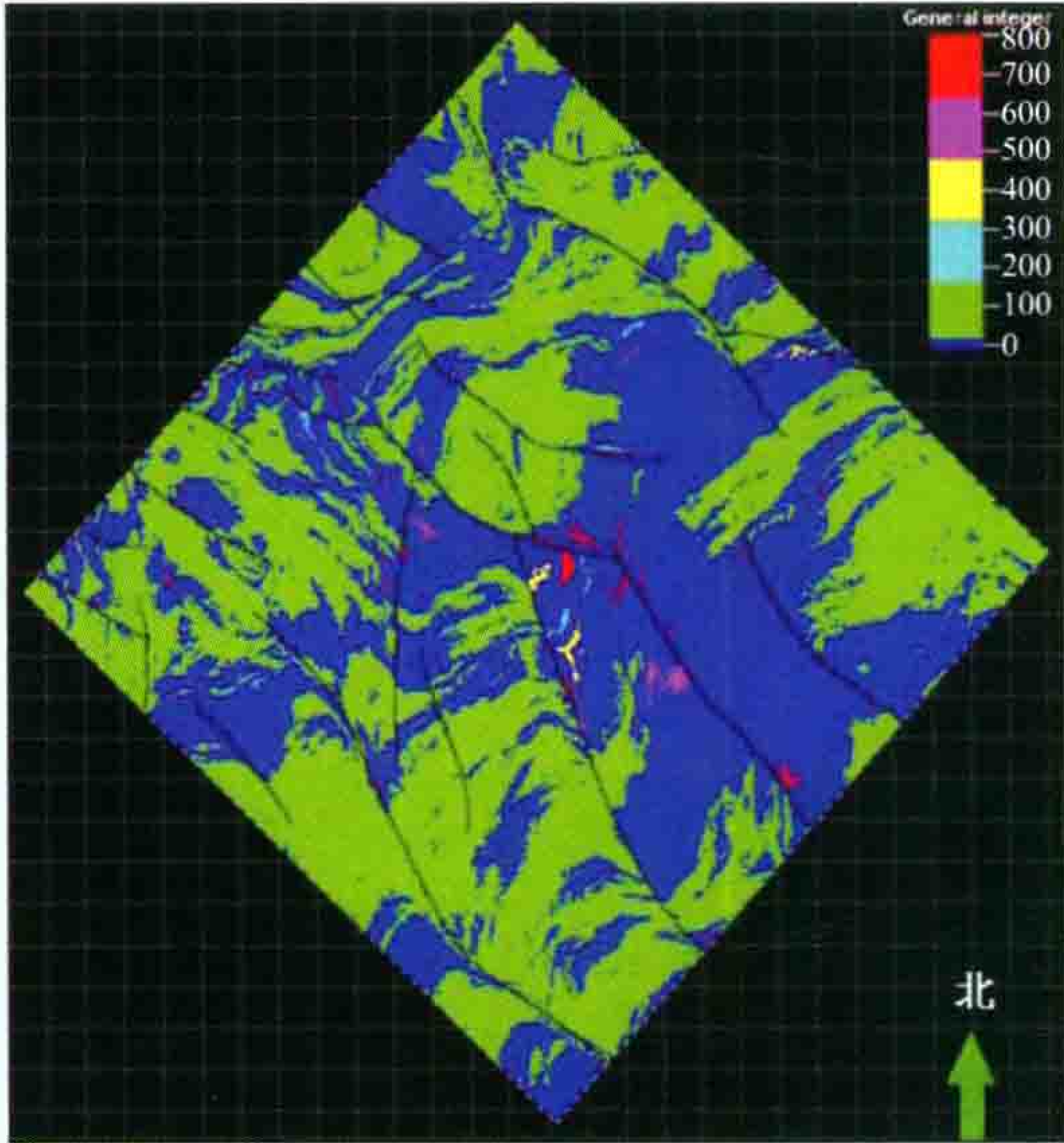


评价切片13

图 23 TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 13(深度 1360 m)



岩性切片14



评价切片14

图 24 TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 11(深度 1365 m)

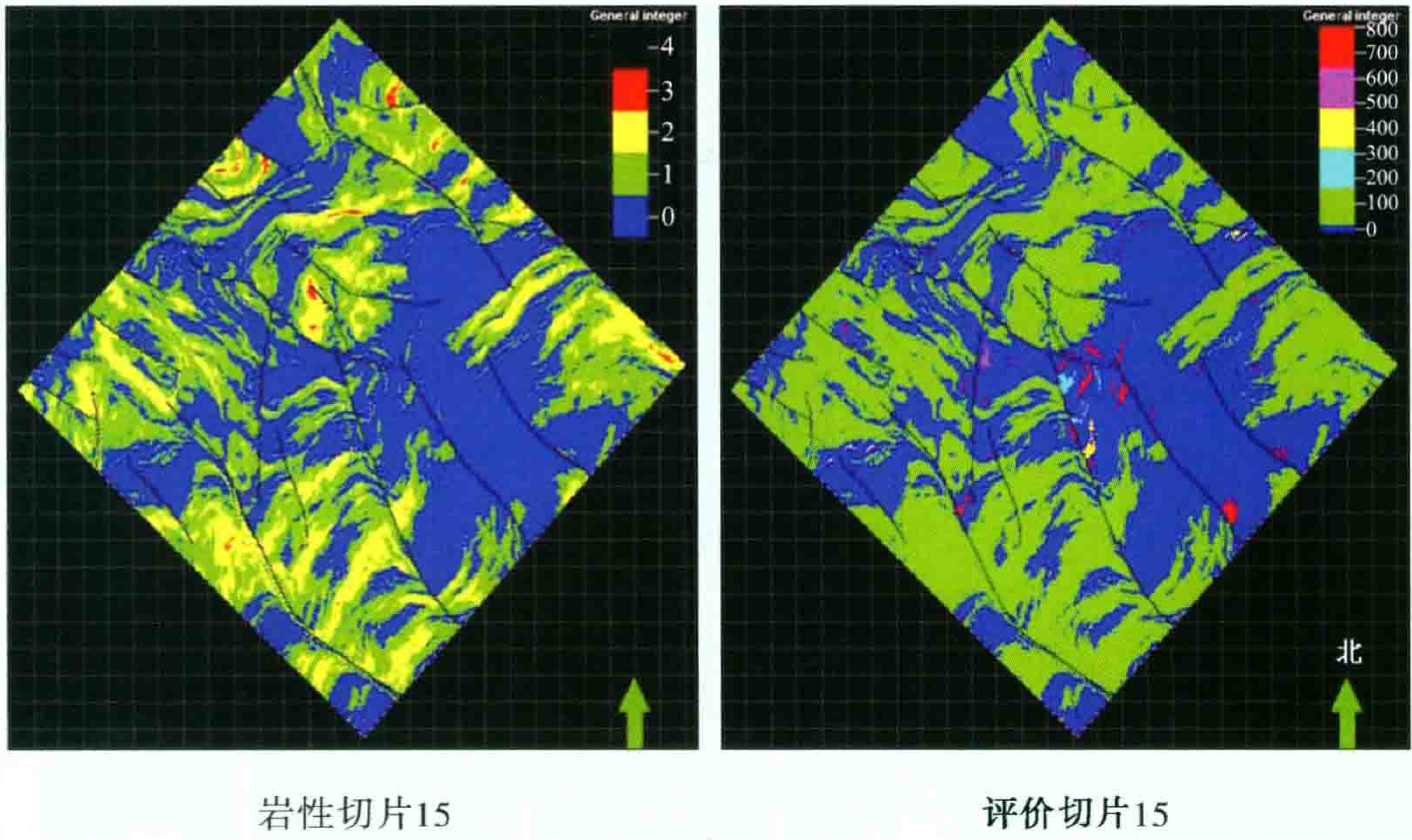


图 25 TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 15(深度 1370 m)

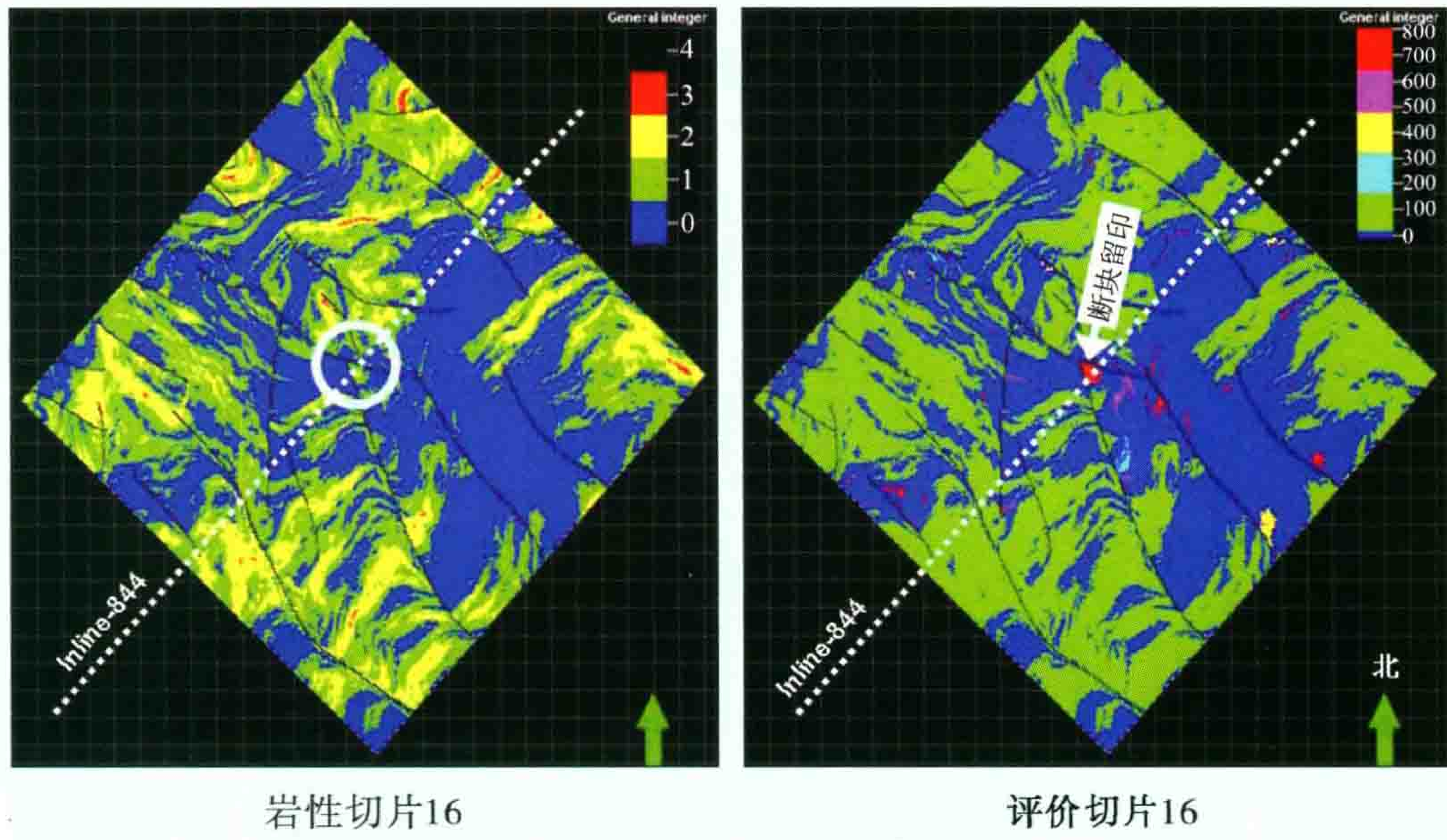


图 26 TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 16(深度 1375 m)

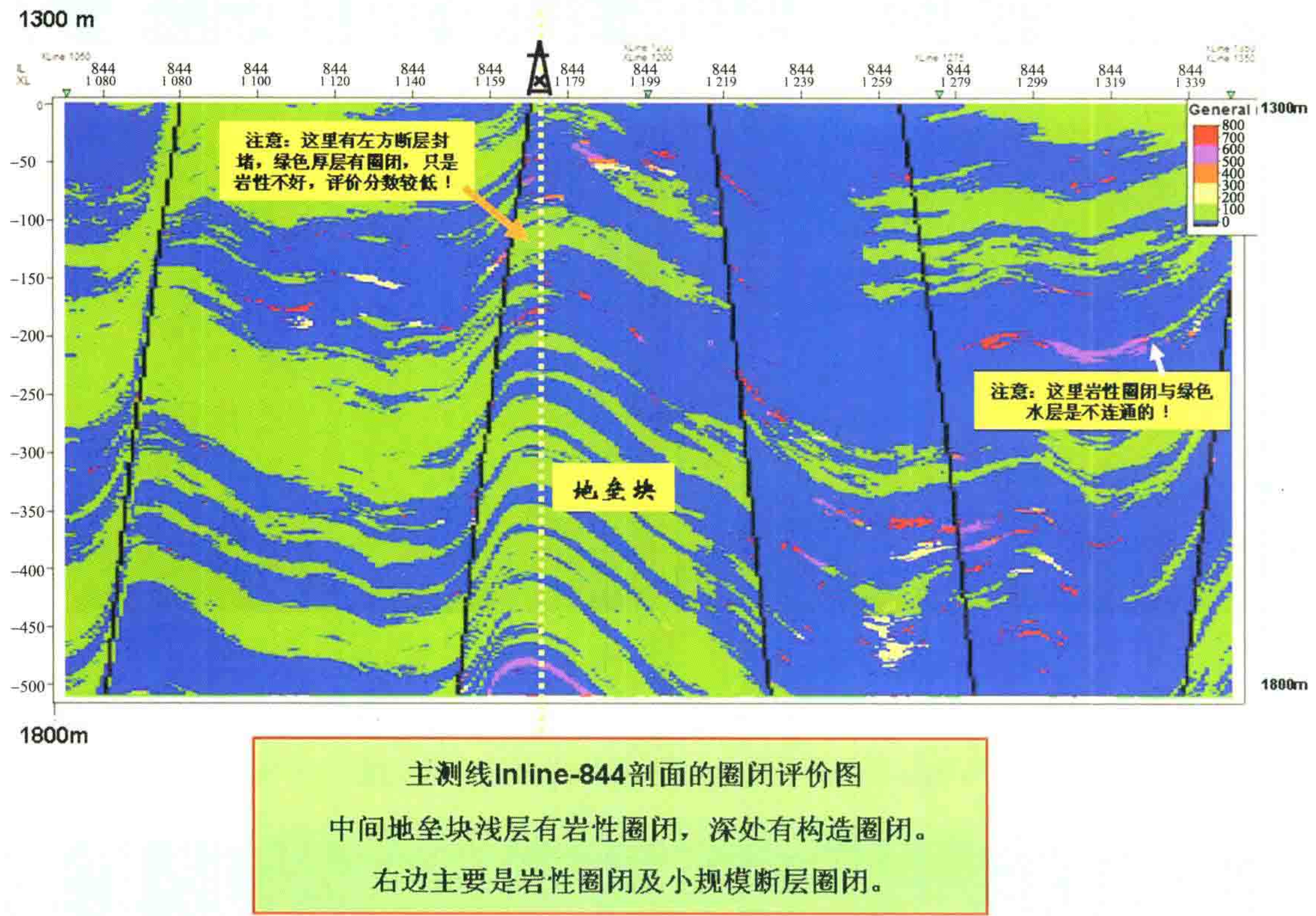


图 27 主测线 Inline-844 剖面圈闭评价图

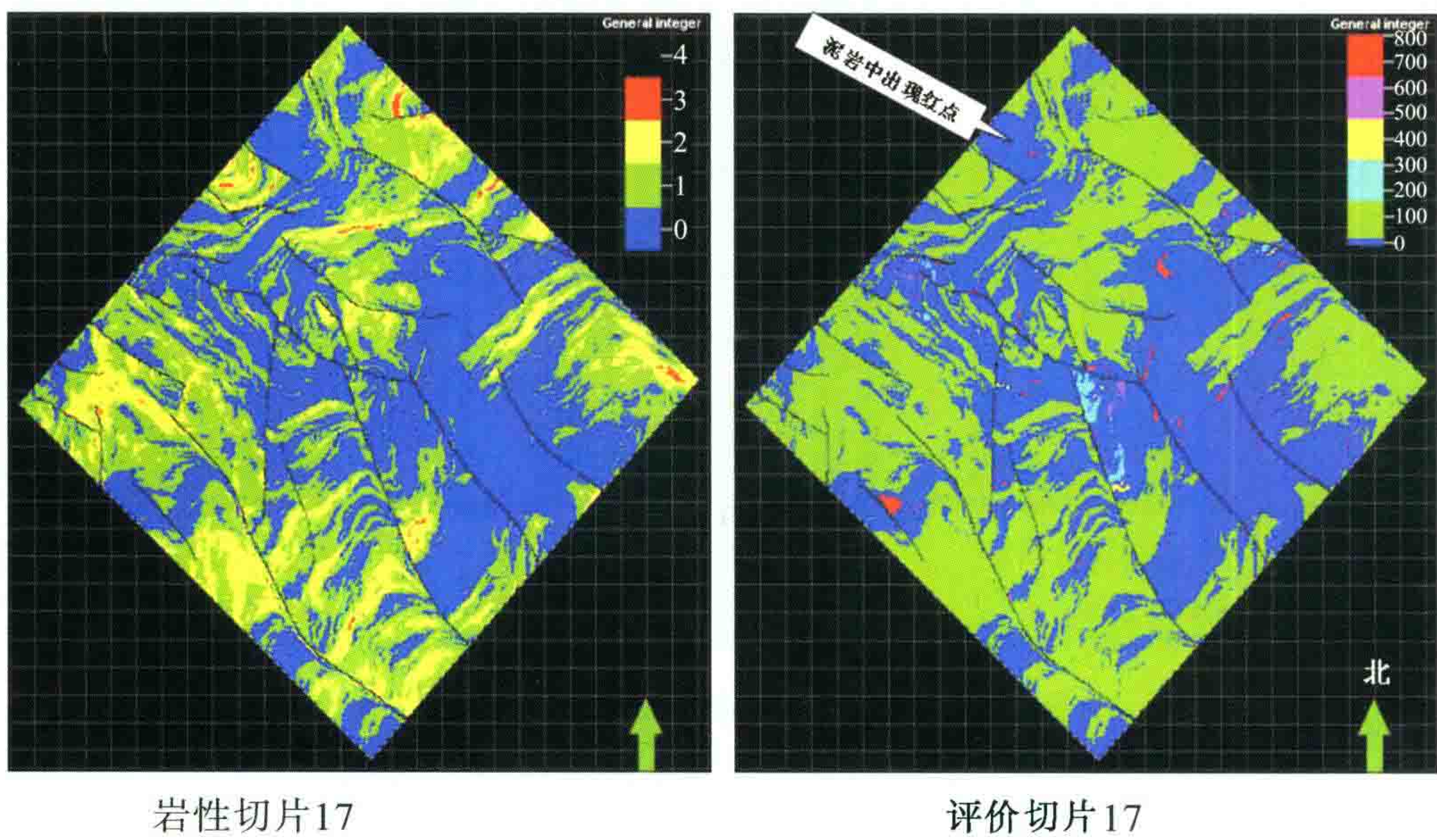


图 28 TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 17(深度 1380 m)

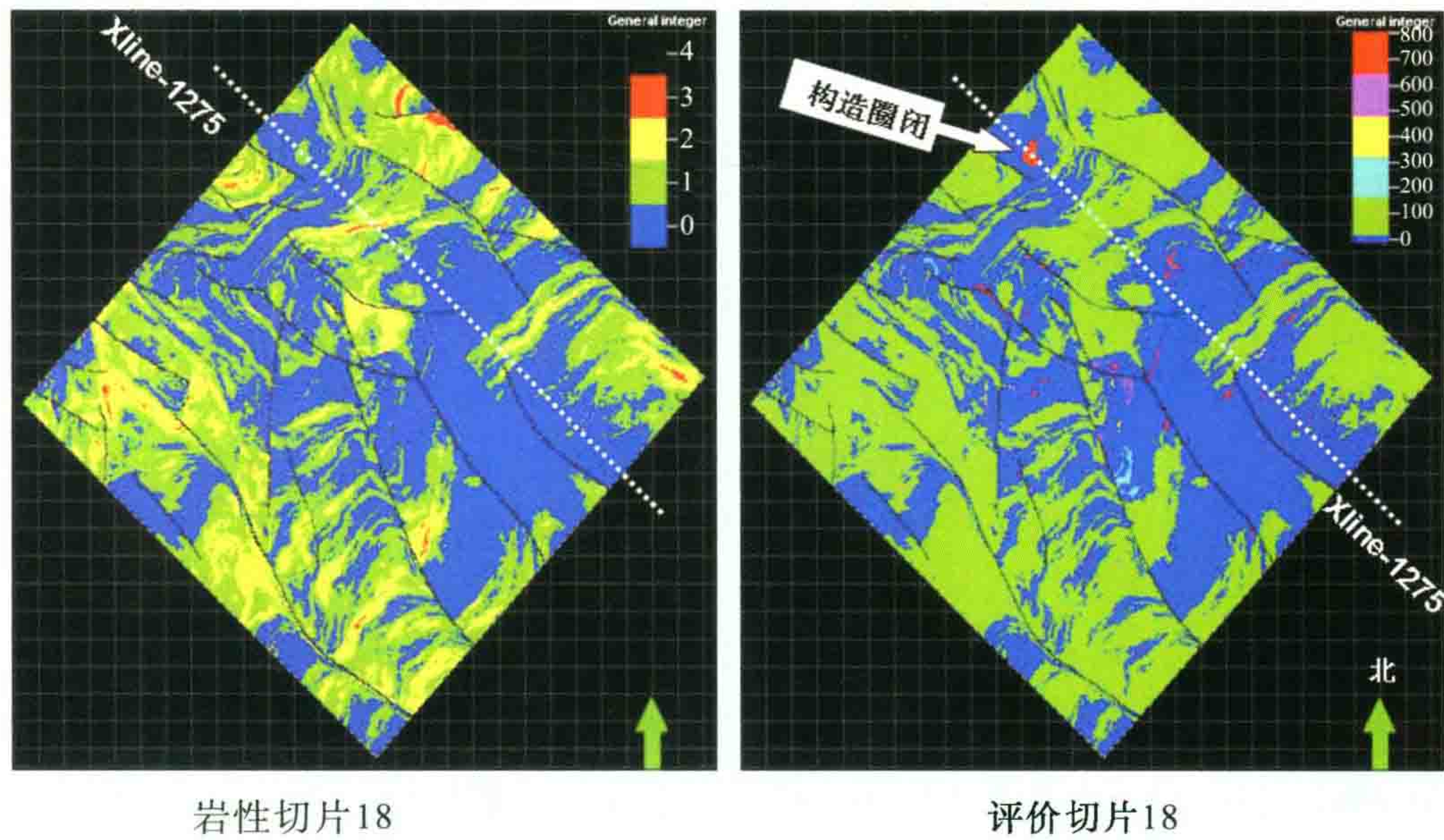


图 29　TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 18(深度 1385 m)

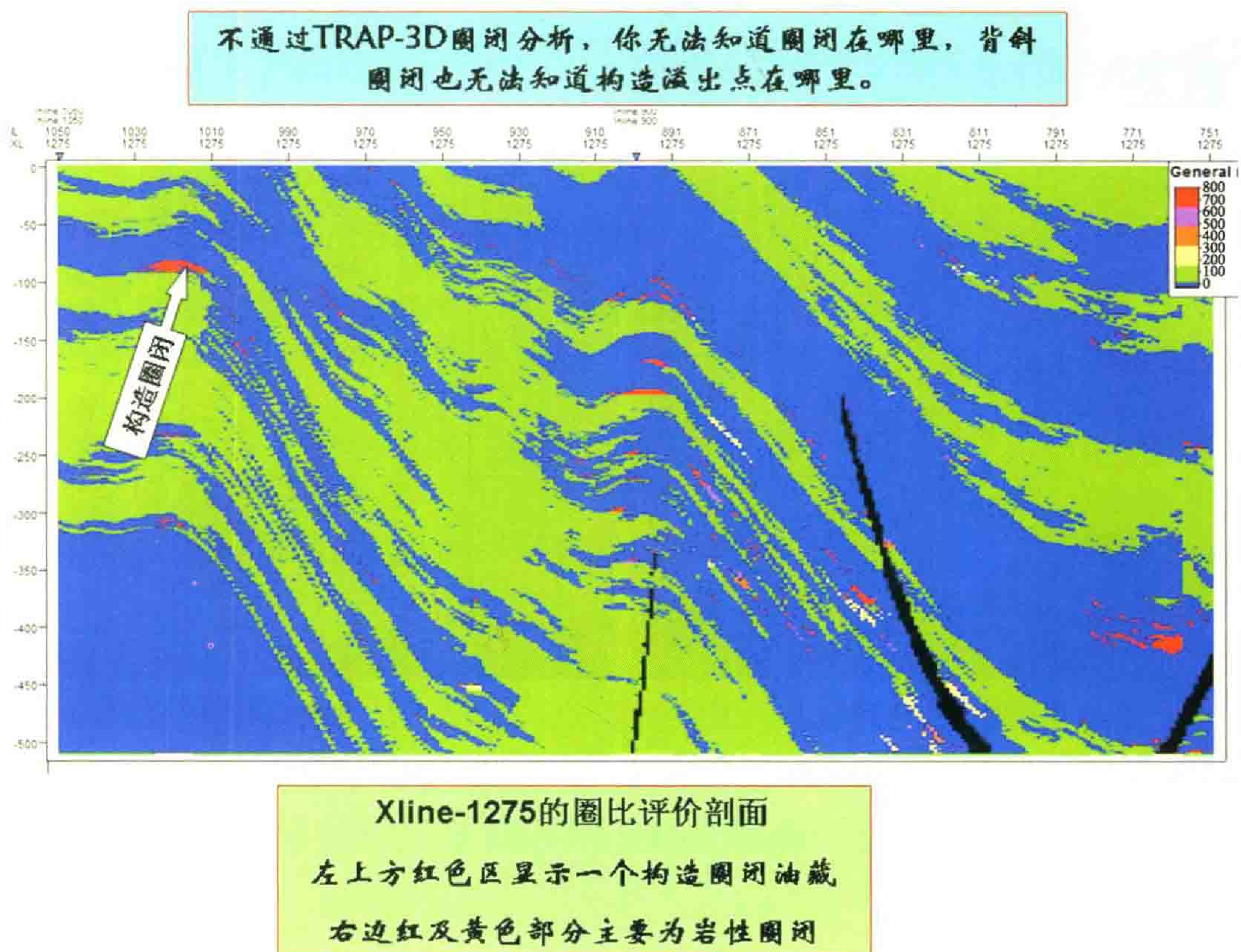


图 30　Xline-1275 圈闭评价图

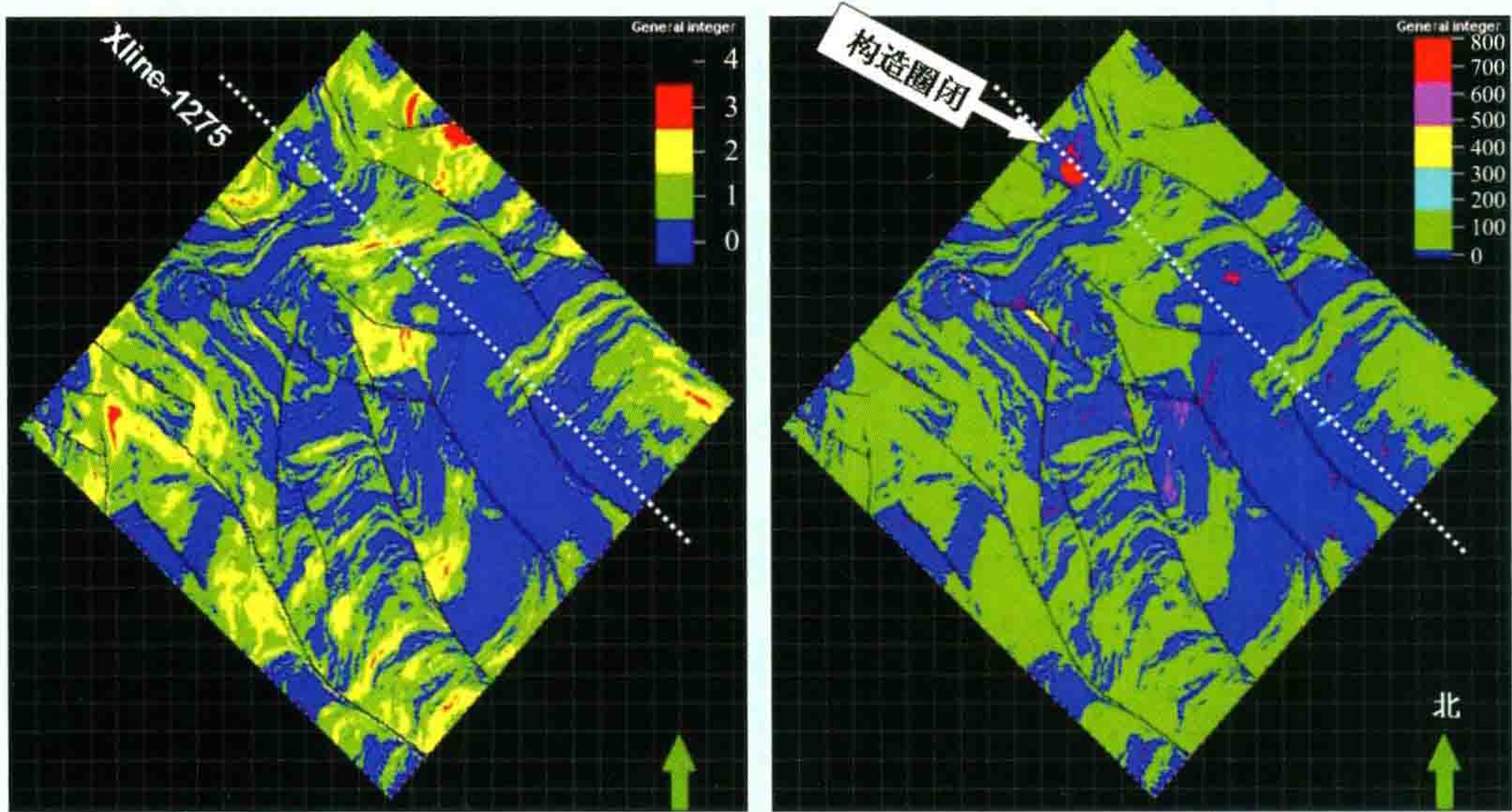


图 31 TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 19(深度 1390 m)

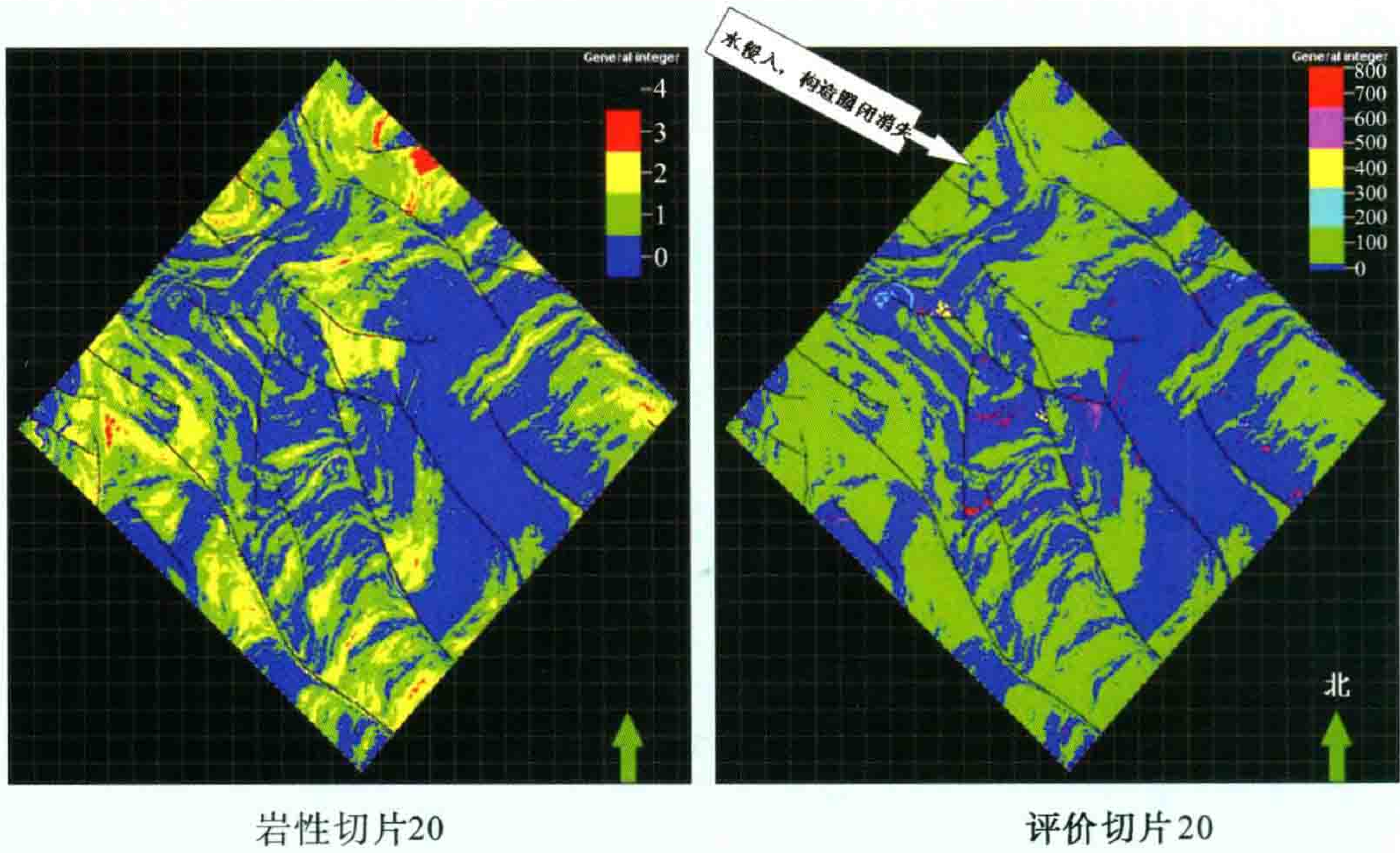


图 32 TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 20(深度 1395 m)

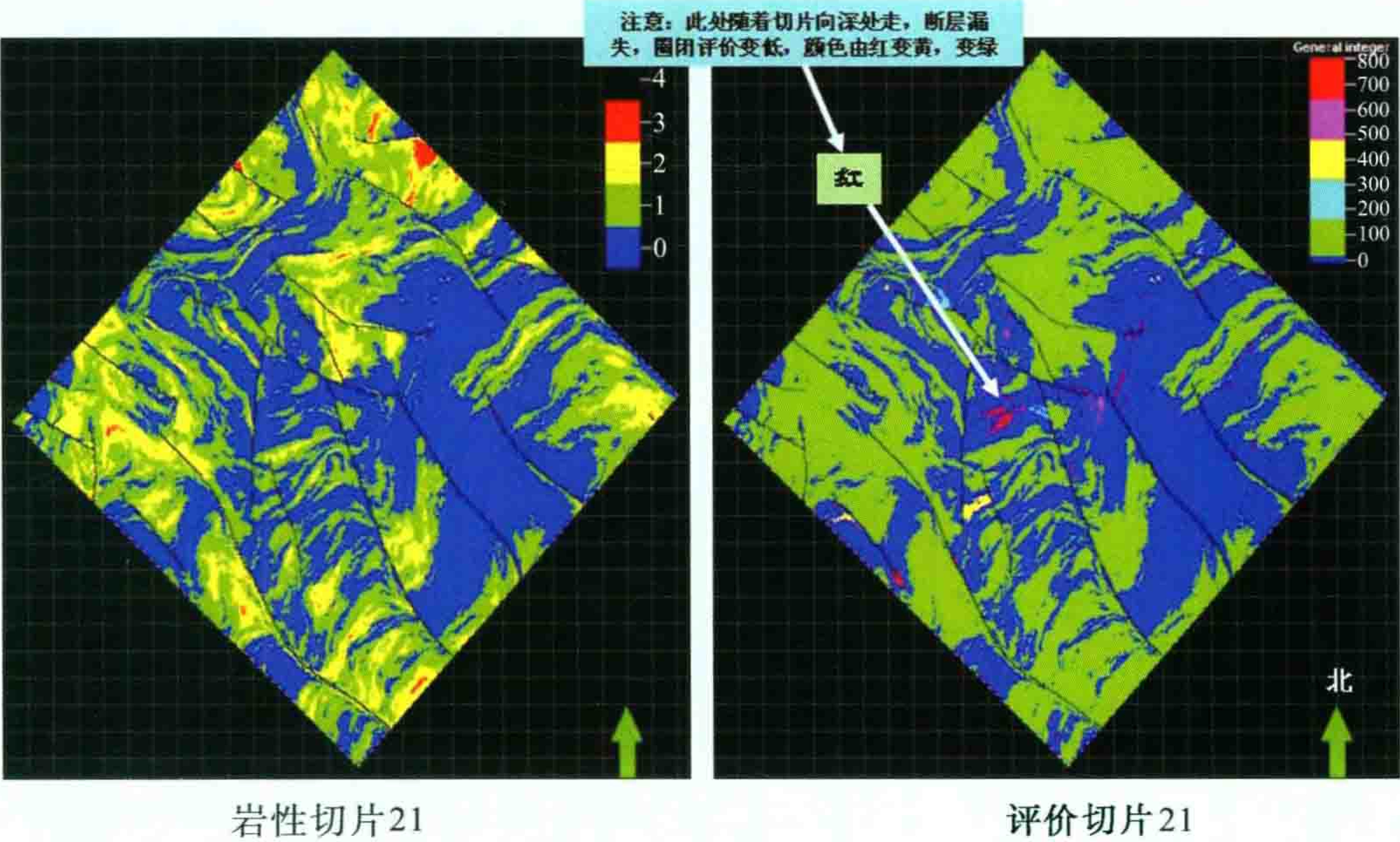


图 33 TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 21(深度 1400 m)

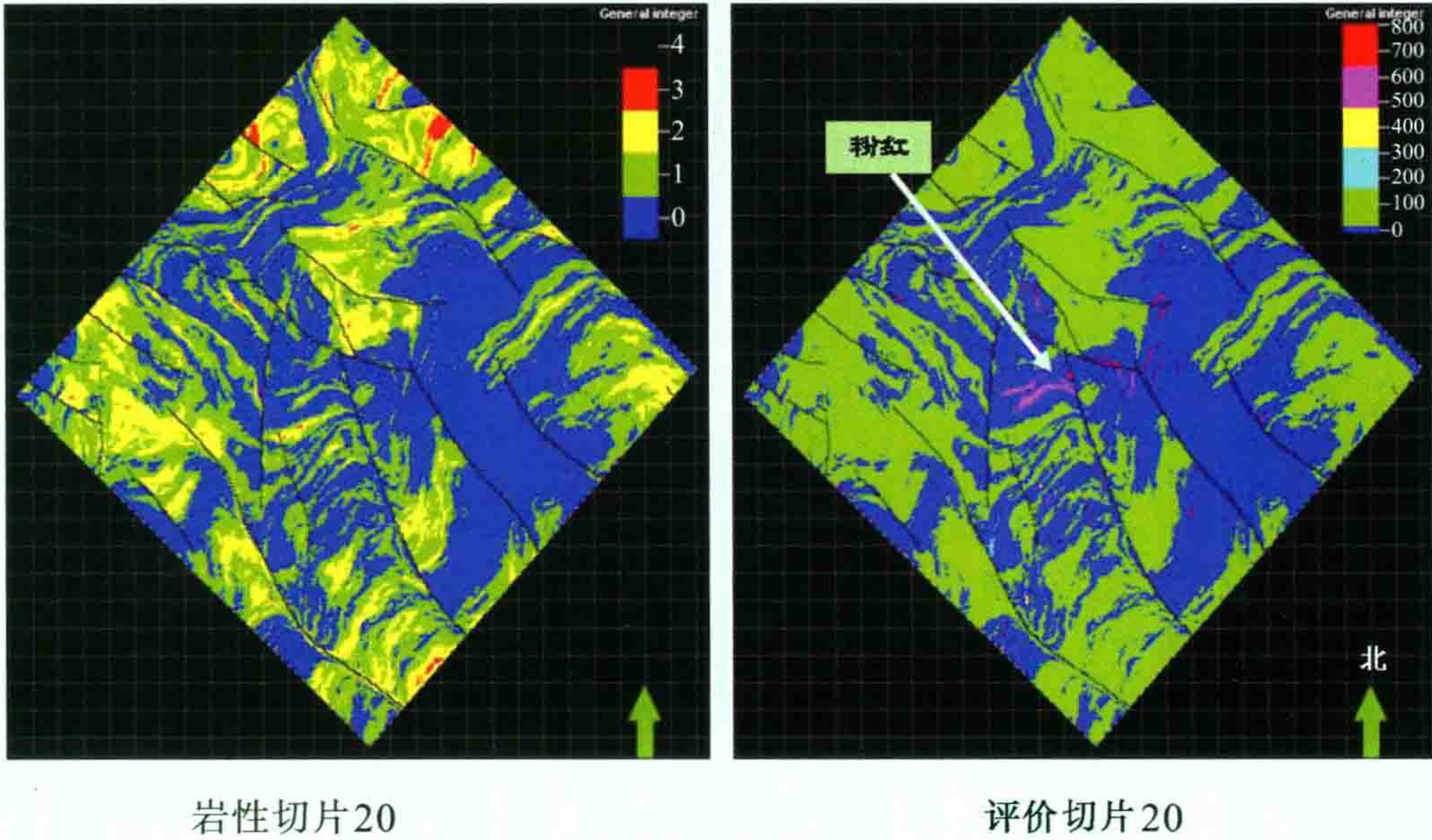


图 34 TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 22(深度 1405 m)

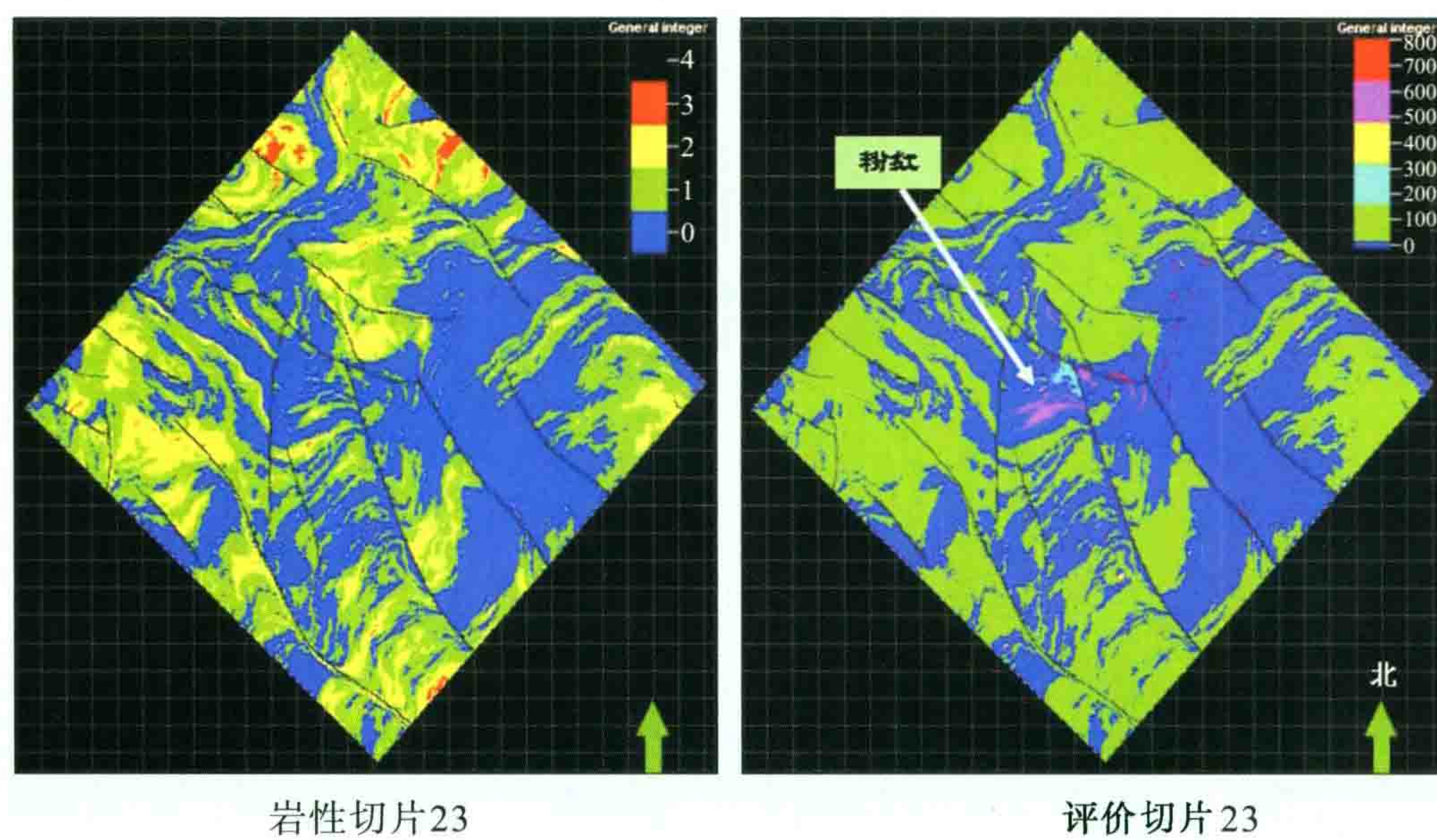


图 35 TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 23(深度 1410 m)

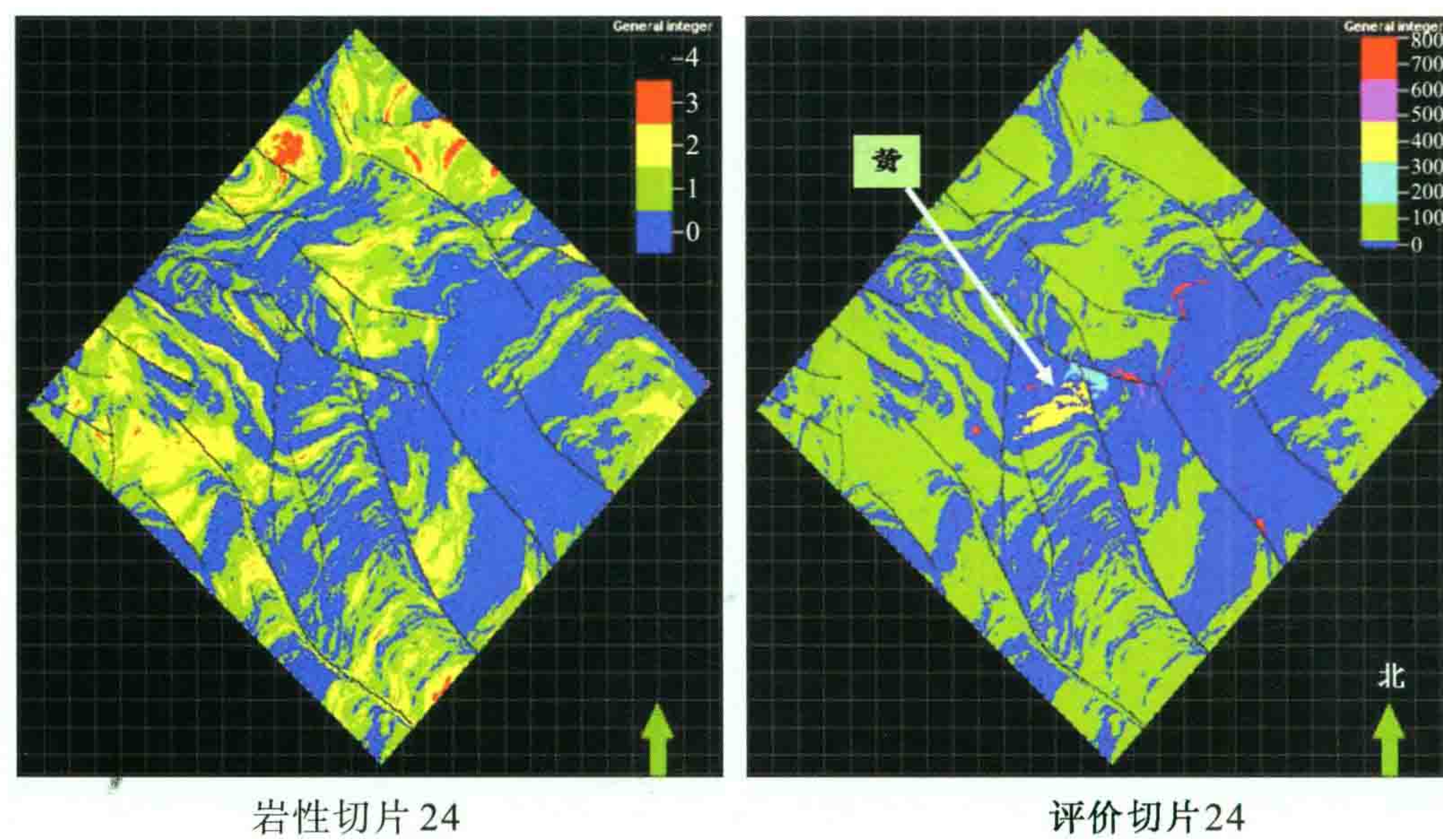


图 36 TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 24(深度 1415 m)

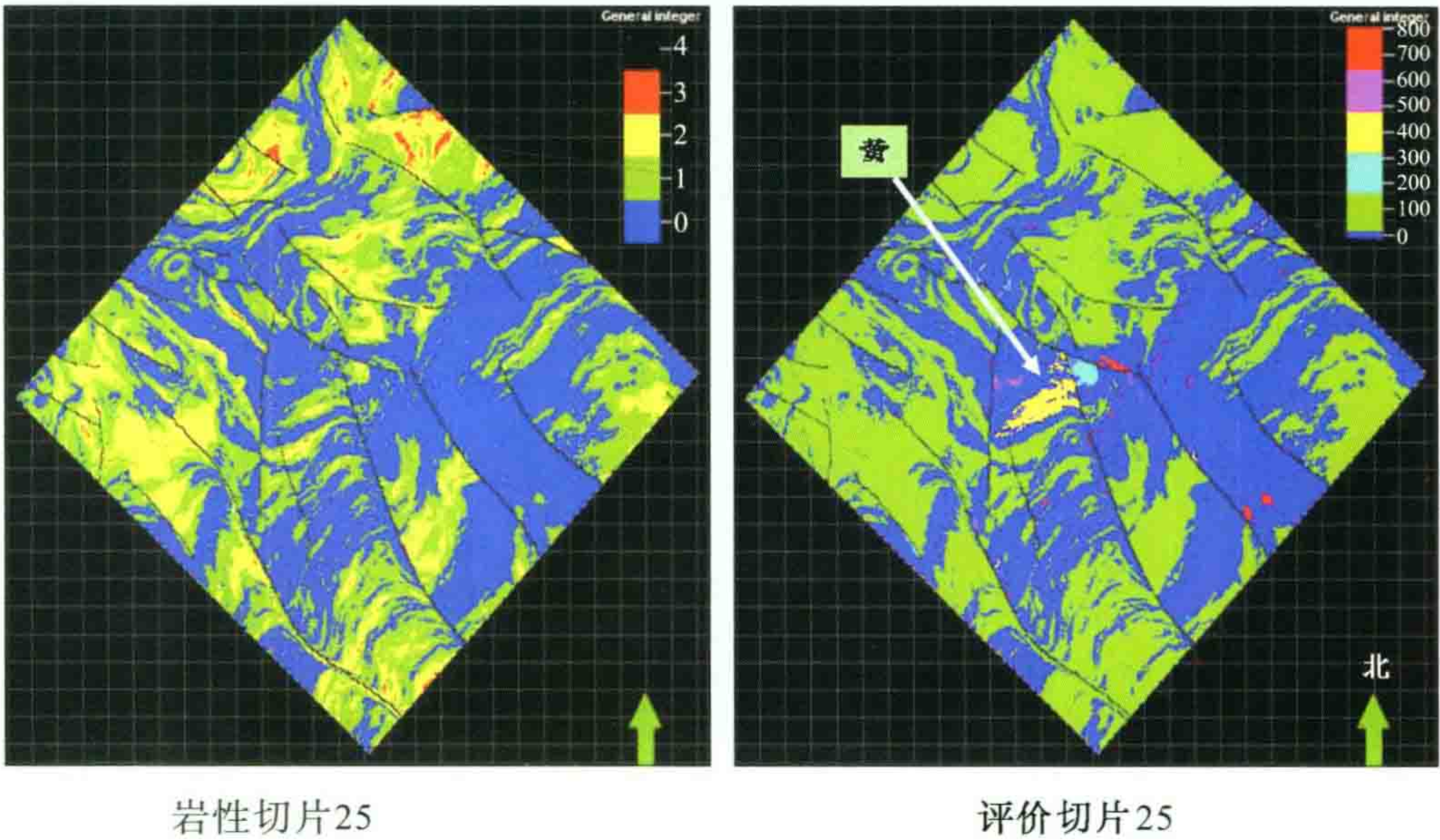


图 37　TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 25(深度 1420 m)

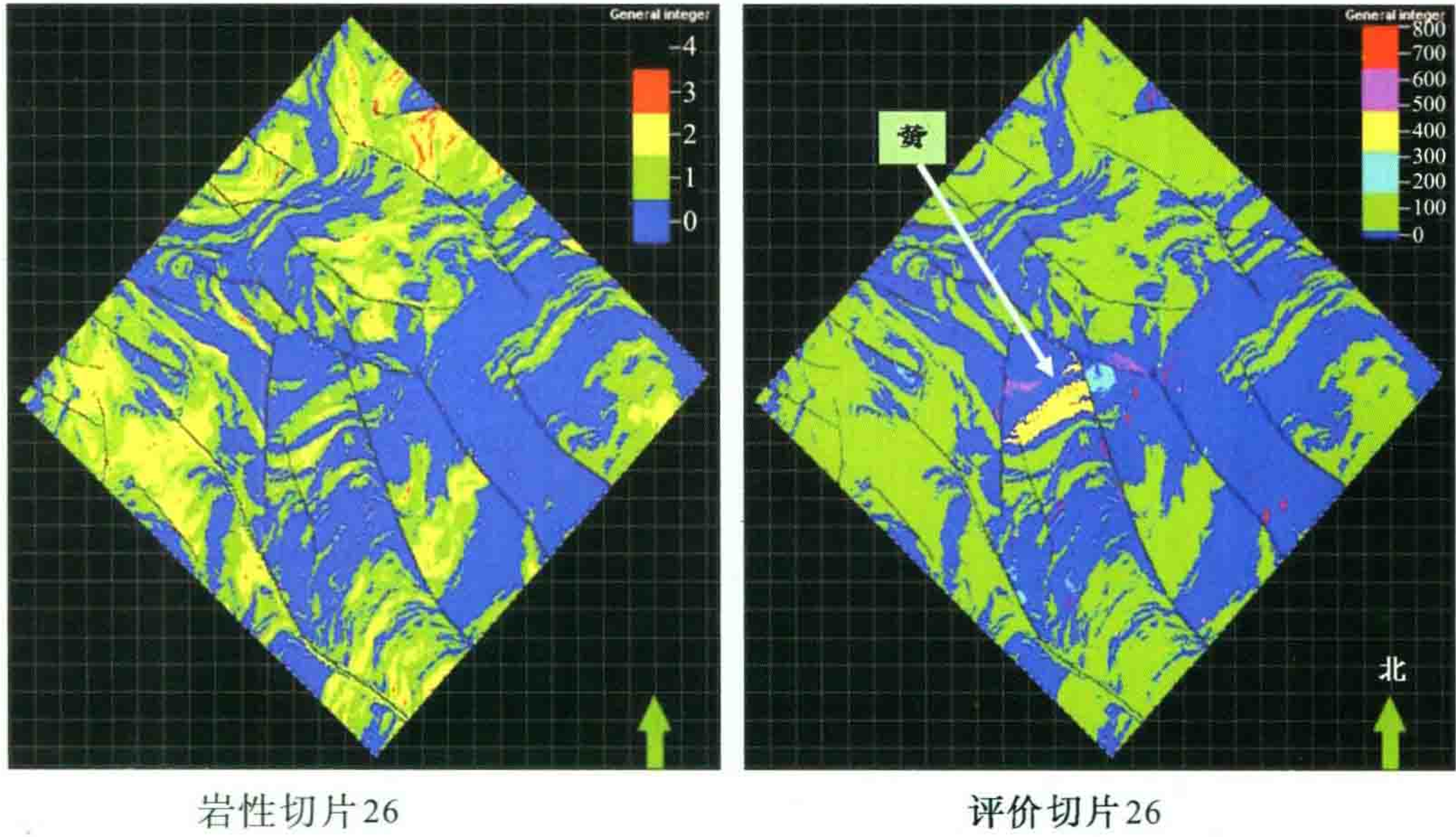


图 38　TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 26(深度 1425 m)

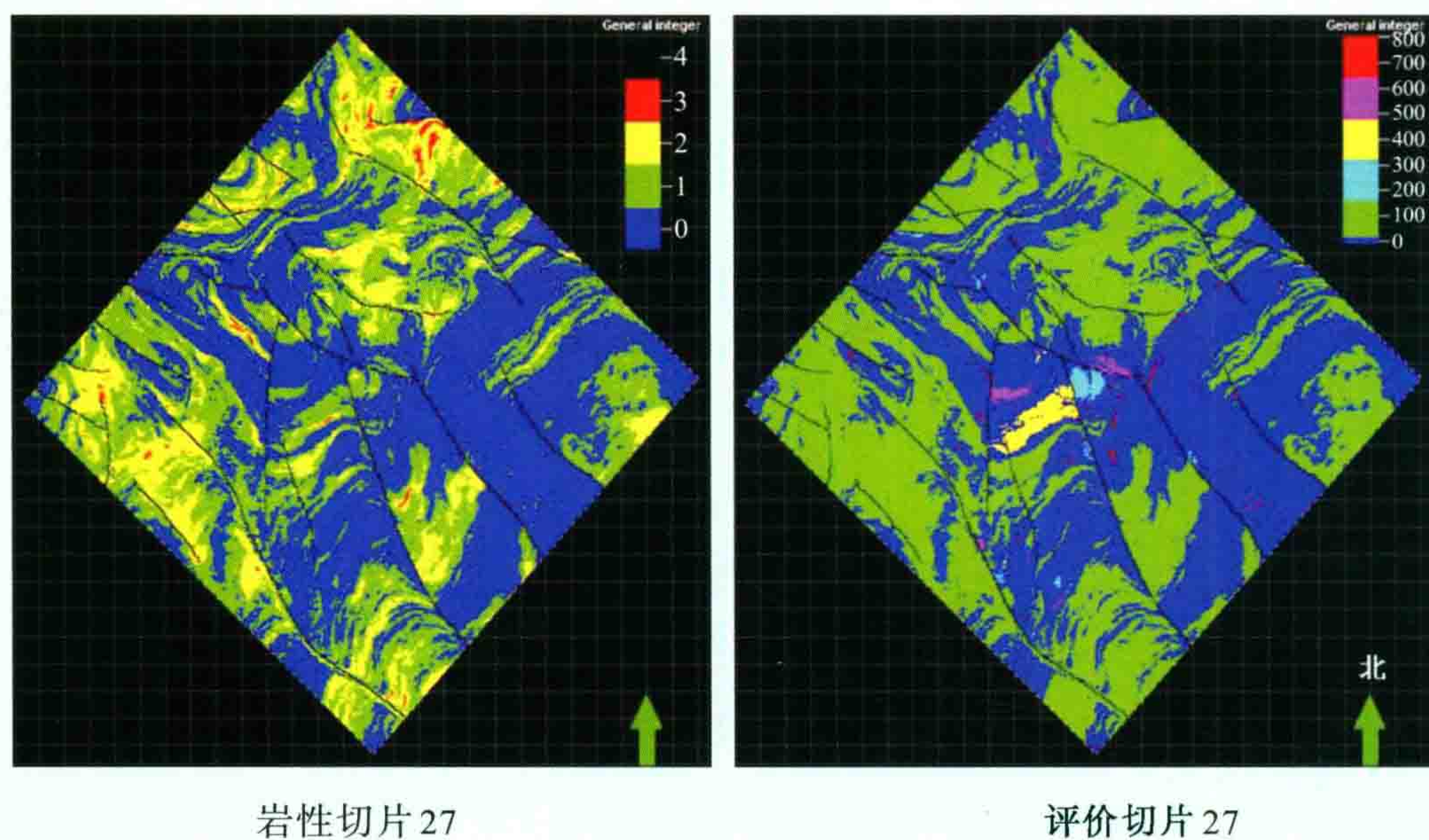


图 39 TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 27(深度 1430 m)

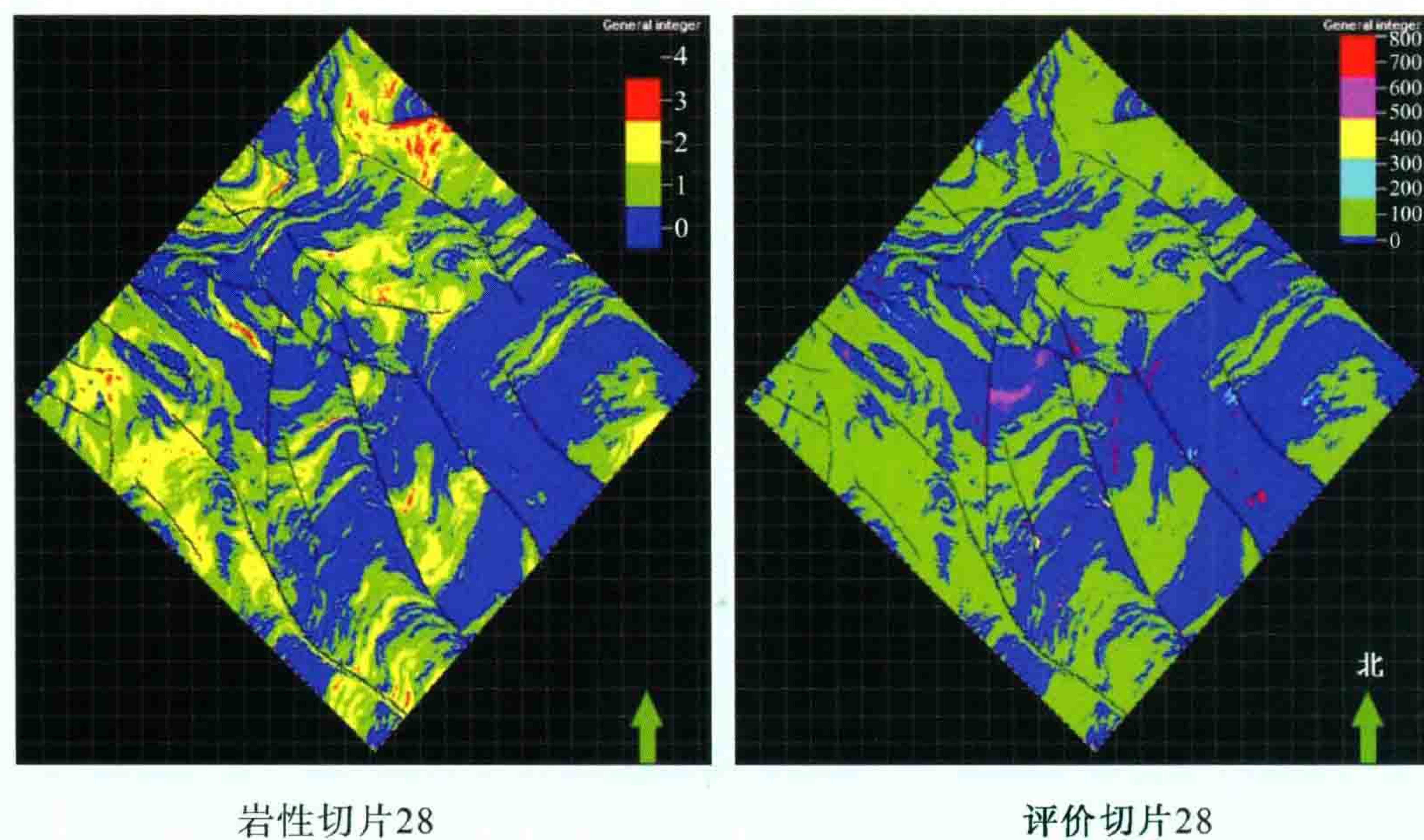


图 40 TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 28(深度 1435 m)

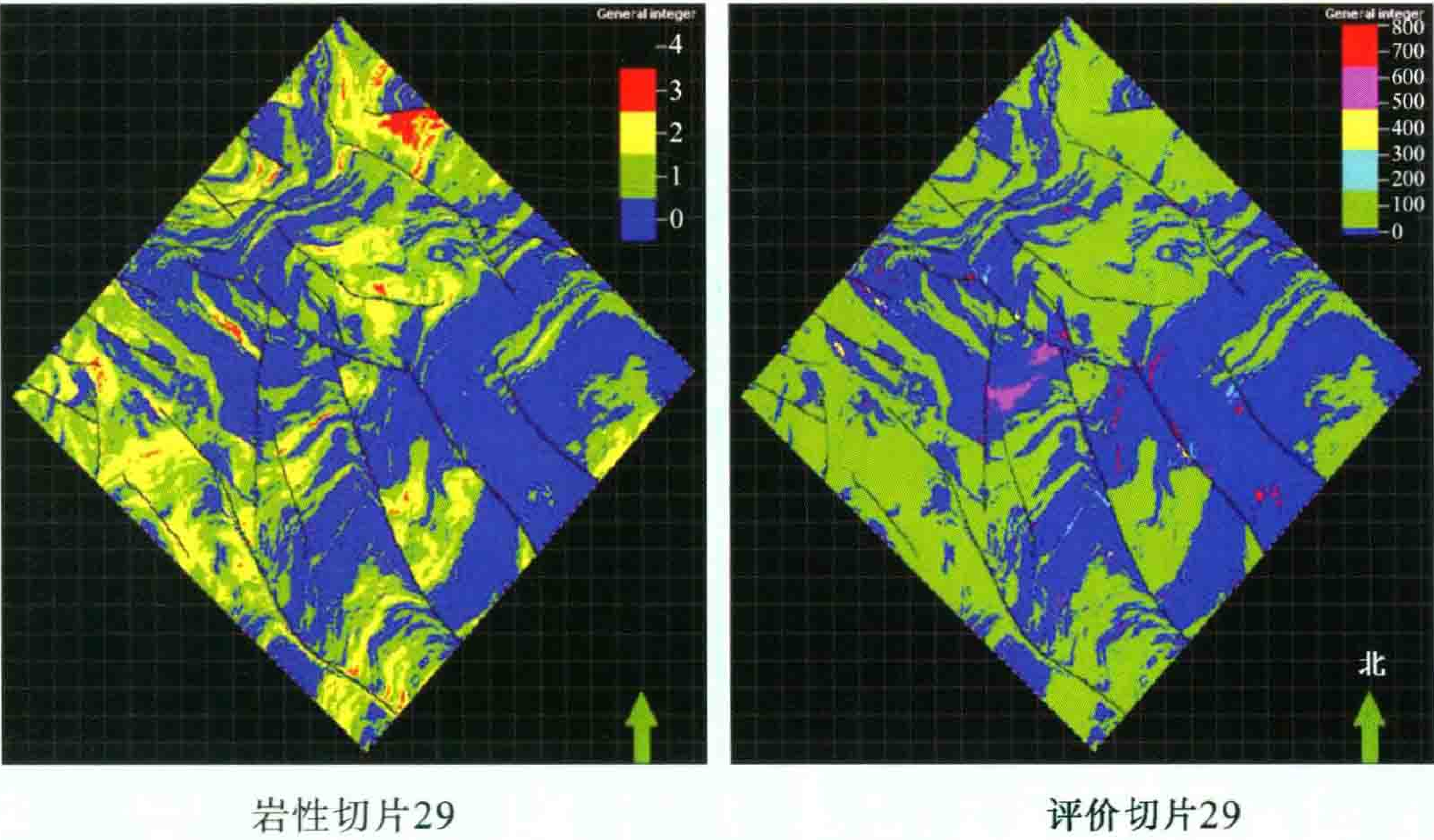


图 41　TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 29(深度 1440 m)

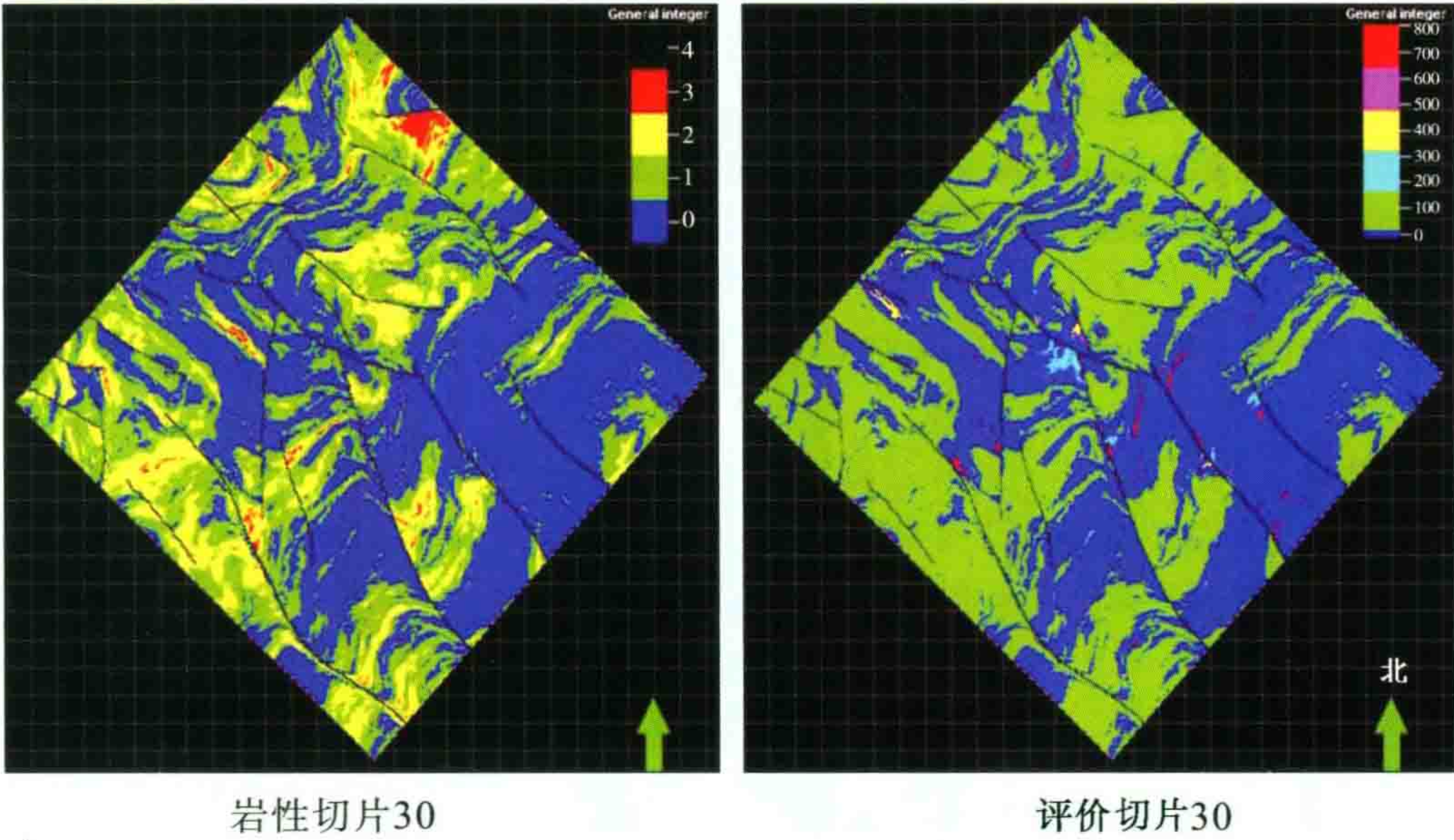


图 42　TN 油田 TRAP-3D 三维圈闭分析的切片显示 30(深度 1445 m)

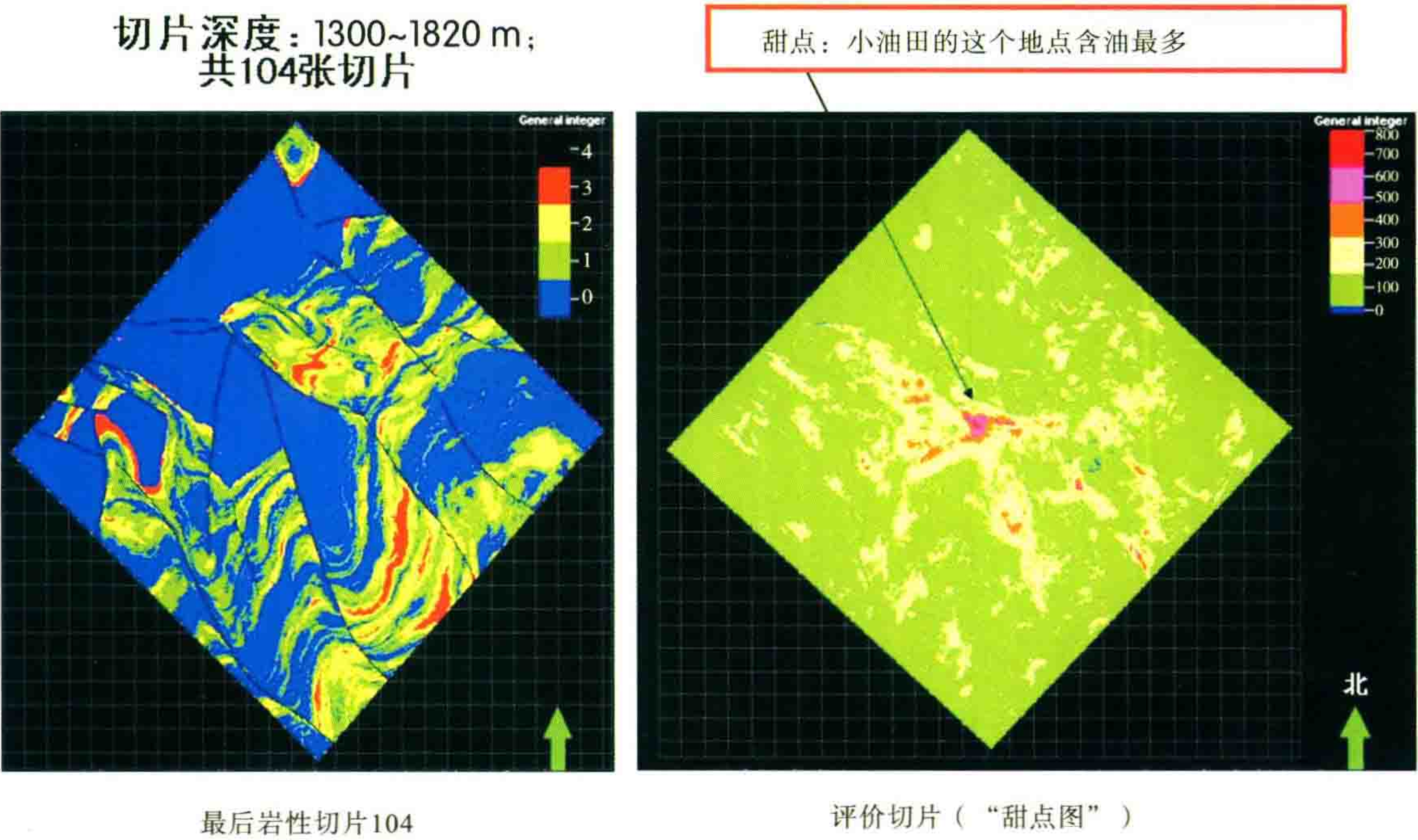


图 43 最后岩性切片 104 及评价切片(“甜点图”)

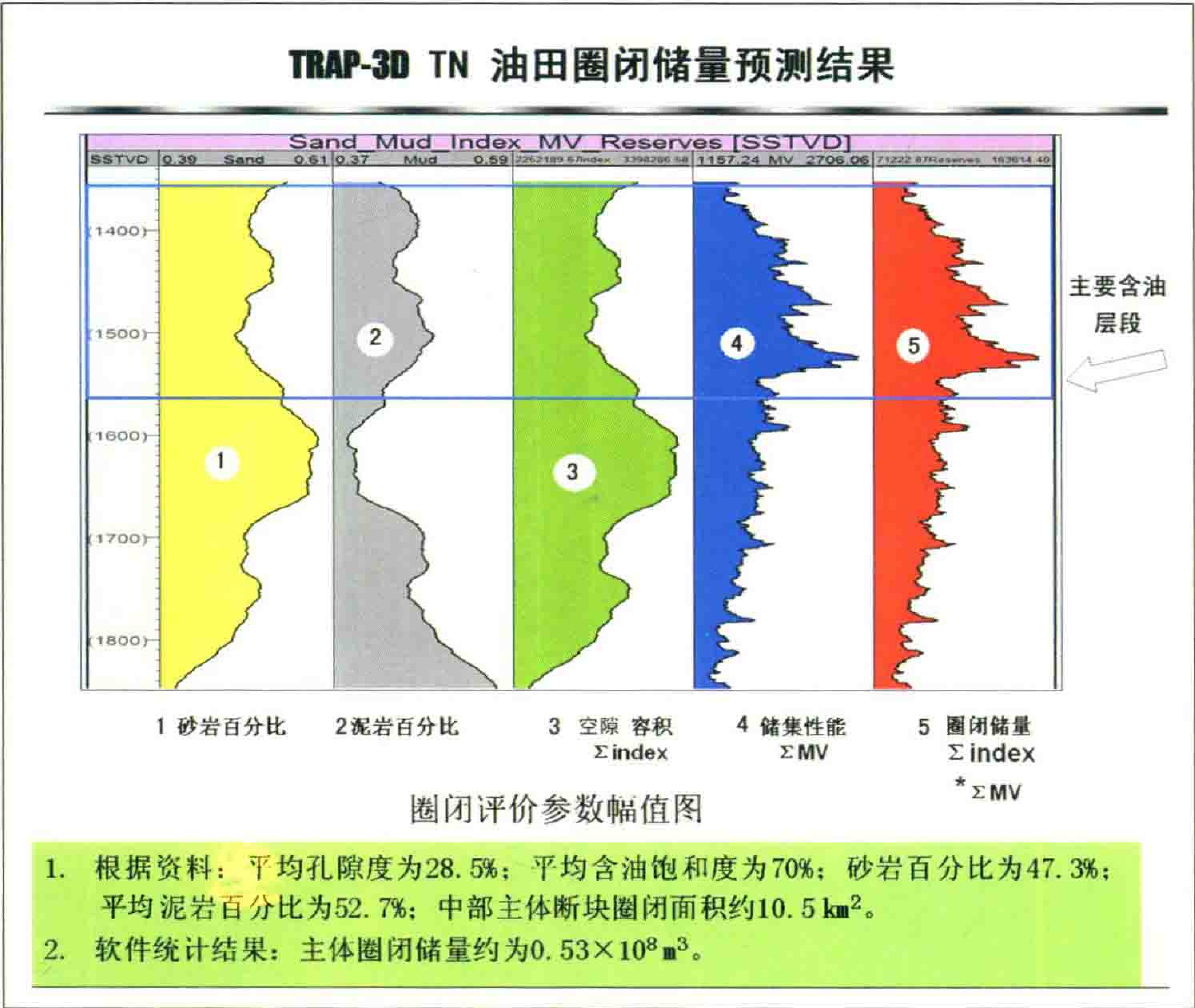


图 44 TN 油田圈闭储量预测结果

图 44 所示为利用 TRAP-3D 对 TN 油田的圈闭储量预测结果。这张 5 条彩色曲线的图中，纵坐标是深度，单位是 m。

第一条曲线(黄色)是砂岩百分比，第二条是(灰色)泥岩百分比，第三条(绿色)是每个深度上切片中所

有岩性指数的累加，它反映该切片里的孔隙的容积大小。第四条曲线（蓝色）是每个切片里的圈闭评价的总和。第五条曲线（红色）是圈闭储量，它是曲线 3 孔隙容积与曲线 4 圈闭评价的相乘，它反映了每个切片里的能够装油的圈闭储量大小。

值得注意的是上部 1340～1550 m 区间里圈闭量（红色曲线）向下递增，是该油田的主要储油层段，砂岩百分比在 40%左右。而下方 1550 m 以下砂岩百分比很高，达 60%，中间绿色曲线反映储集容积很大，但是那里圈闭评价反而很低，圈闭量也降低。——这和我文章编号 304-1 里阐述的断块封闭的总规律是一致的，即砂岩百分比高到 60%以上是不容易形成断块圈闭的。

本区的圈闭储量计算结果如下。

（1）根据资料：平均孔隙度为 28.5%；平均含油饱和度为 70%；砂岩百分比为 47.3%；泥岩百分比为 52.7%；中部主体圈闭面积约 10.5 km^2。

（2）软件统计结果：主体圈闭储量约为 0.53×10^8 m^3。

四、结论

通过程序的测试及改进，到 2013 年 3 月，首次在 TN 油田通过实际资料运行，获得了可喜的成果。

TRAP-3D 三维圈闭分析技术完成了连续的切片的和剖面的圈闭评价，它与探井判断的含油范围基本吻合，我们的图件更具有定量的概念，除了断块圈闭之外，还囊括了构造圈闭及岩性圈闭，并且最后画出“甜点图”，定量计算出工区的总圈闭体积。本方法可以在测区内把构造圈闭、断块圈闭、岩性圈闭及地层圈闭，统统找出来。在已经打井采油的老油田，还可以进一步计算“未动用储量”和“死油区”的分布。

TRAP-3D 技术是对石油地质理论中“圈闭”概念的一次升华。它说明过去把构造与岩性分离开来，是不能定义“圈闭”的，也无法准确计算圈闭量。而关于断块圈闭分析的目前所有商业软件都无法解决复杂断块的三维断块圈闭量的估算。目前更没有定量分析岩性圈闭的软件，所以，本 TRAP-3D 软件是十分重要的技术进步。

至此，已经证实我们的三维圈闭分析的思路正确、程序正确、运行正确。它是今后很有前途的一种寻找油气的工具。

目前该方法对工区的储量估算尚不能说是十分精确。方法本身是精确的，但在少量探井的控制下，实现对全工区地下砂泥岩的分布的预测毕竟存在着多解性。这需要在储层描述过程中，对有井控制的砂层内插与外推的方面做细致的工作。只要储层描述基本是正确的，本方法就能取得良好成效。

本方法适合于孔隙性储层，特别适用于在新生界盆地碎屑岩地层中寻找油气。目前尚不能解决裂缝性储层的勘探与开发。

本 TRAP-3D 方法及软件已申请发明专利。



文章编号 304-5

有井内插砂层与无井砂层内插方法的结合

——对 TRAP-3D 方法的补充意见



TRAP-3D 是我通过多年来的努力编写成的一个完整的包括 12 个功能软件的分析软件包。

在工区内有几口测井的情况下，用声波或自然伽马曲线可以内插整个三维数据体的砂泥岩分布，形成一个岩性立方体 Cube。再把解释好的断层数据文件插入这个岩性 Cube 中，就可以作为 TRAP-3D 的输入了。

在 TN 油田第一次应用试验里，碰到仅有的几口井分布在西北角，控制不了东南角内插砂层的合理性；并且那里还有火成岩穿插及侵入，解释岩性又遇到新问题。

于是，我写了此文。我想到，地震资料的波阻抗反演不是也能粗略地区分岩性吗？如果工区里没有打井，不也能得到三维岩性体加断层的 Cube 吗？

这条思路打开了在无井条件下实现砂层内插的 TRAP-3D 应用的前景。当然，如果把无井与有井的砂层内插结合起来，可能效果会更好。

一、起因

我把油藏研究中心解释的 TN 油田的反射剖面与砂层内插剖面两张图的位置对齐，发现反射强振幅还有不少地方与砂层发育带不符（图 1、图 2、图 3）。我认为这个内插的结果可能还有问题。

图 1 是地震 L844 反射剖面，在图中间有一个地垒，其两边有两条正断层。地垒上有一口探井，画出了井中的测井电阻率曲线。

剖面中部上方我标为 B 之处，反射振幅特强，说明是地垒升起活动造成火成岩的覆盖。就在图 1 的地垒左边，我标的 D 与 A 之间，出现一个地下钻上来的火成岩柱。显然该地区的火成岩活动相当厉害，这为我们砂层内插的岩性判断造成一定困难。

电测曲线表明地垒上的上部为泥岩，中部 3 个含油薄砂层用红色标出，下部为砂岩发育带，明显为含水层。

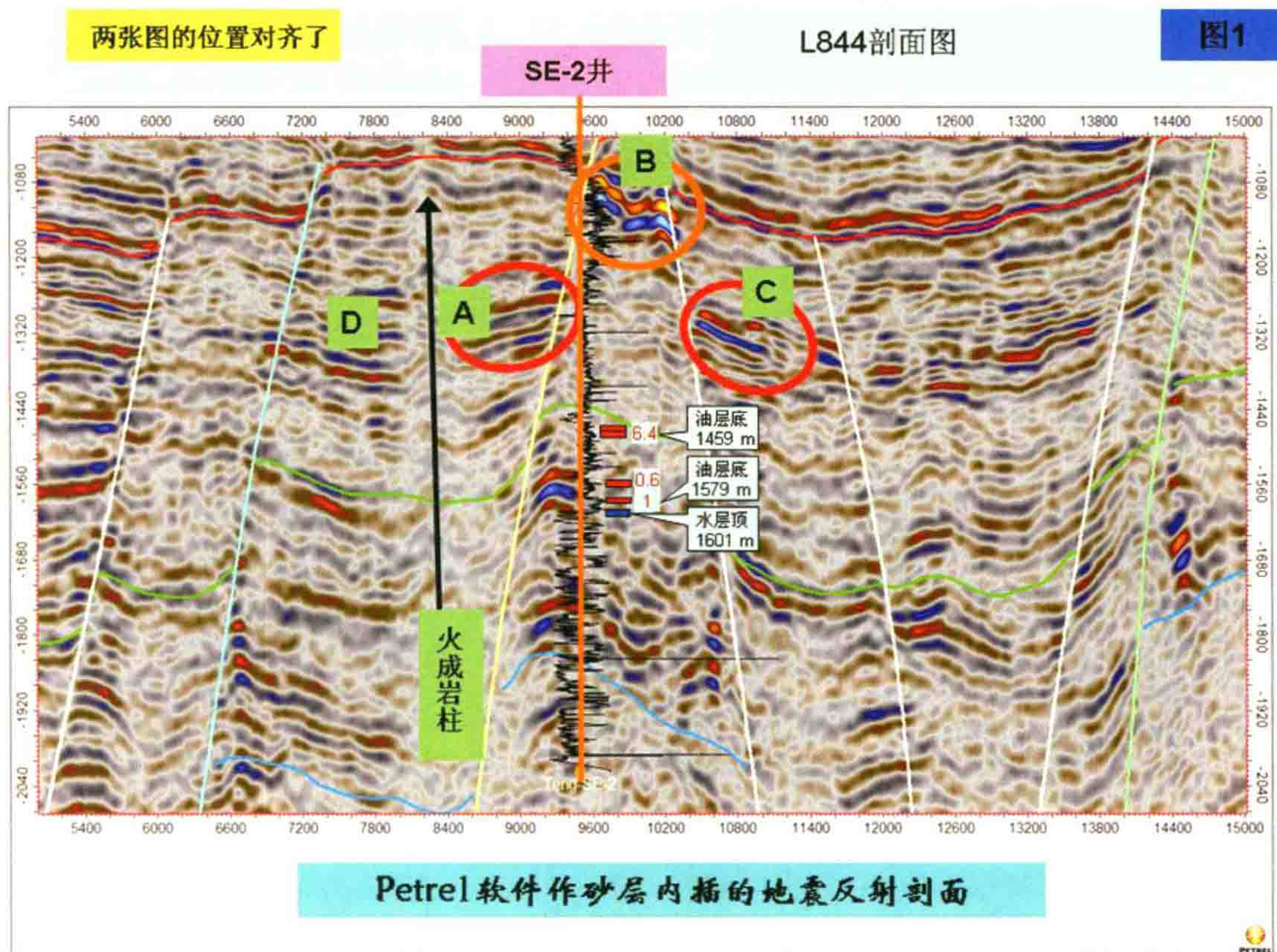


图 1　地震 L844 反射剖面

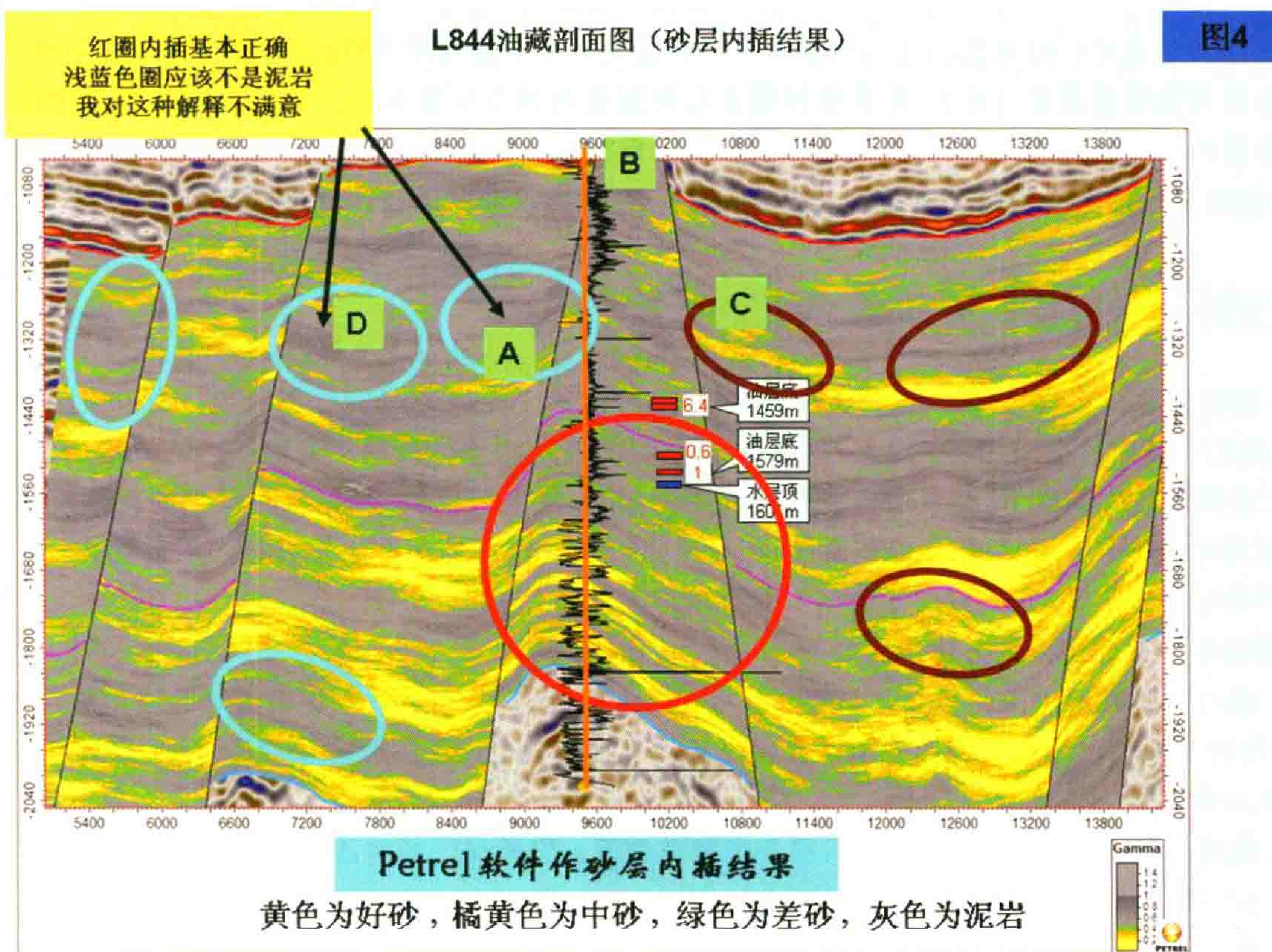


图 2　砂层内插的结果

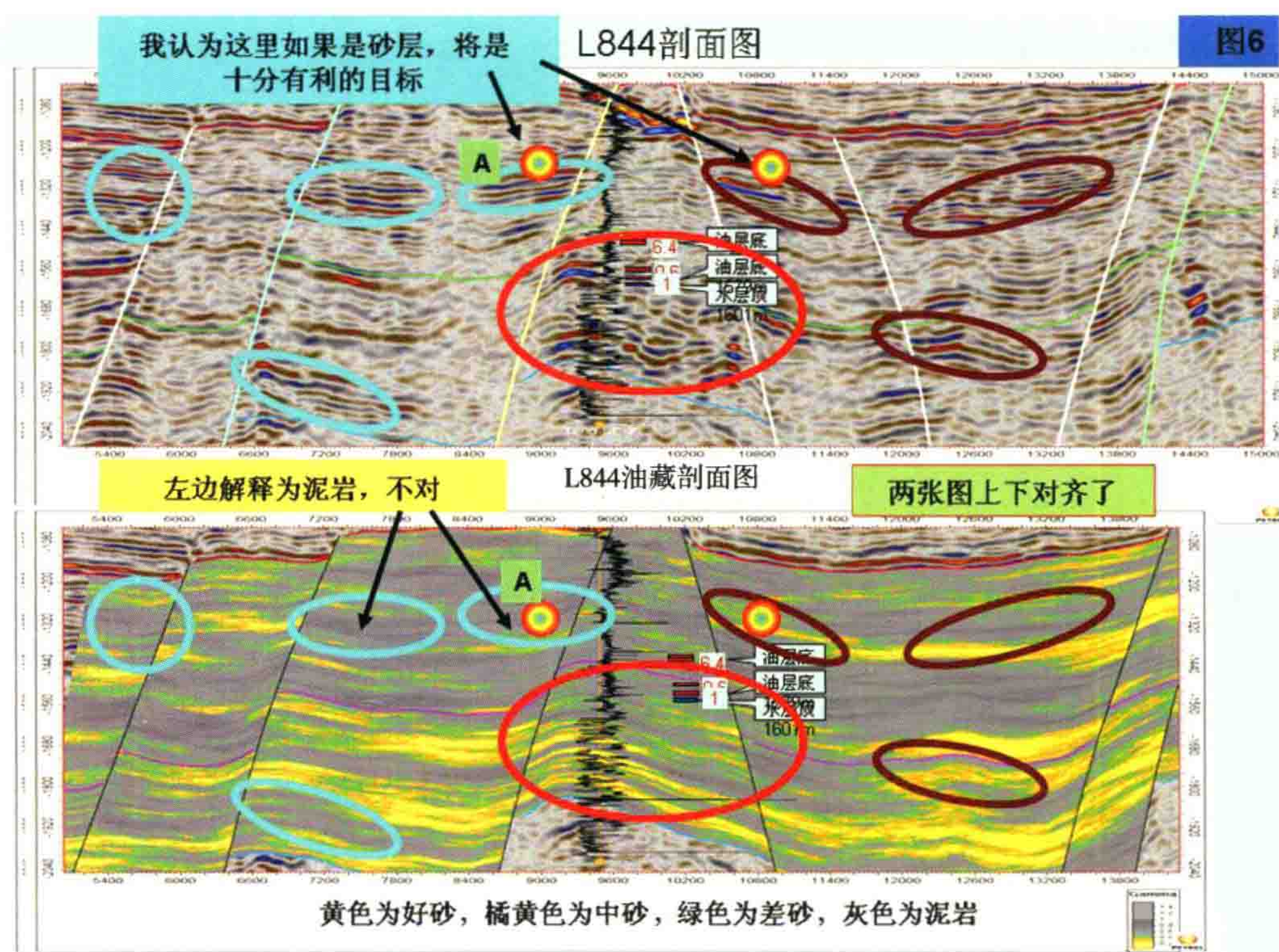


图 3　将两张图对齐后作对比

图 2 是 Petrel 软件砂层内插的结果。图 3 是将两张图上下左右对齐以后作对比。地垒上内插解释的砂泥岩分布与测井资料是符合的，与地震反射振幅也符合较好，我用红色椭圆表示；剖面右边我标 3 个棕色椭圆处也基本合理。但是剖面左边我绘的 4 个椭圆地震反射振幅较强，内插解释为泥岩是不恰当的。

这地区强振幅反映着火成岩，中等强振幅信息则应该与砂岩分布有关。我认为地垒两侧字母 A 与 C 那里如果是砂层，将是十分有利的勘探目标。目前内插解释为泥岩是不恰当的。再向左，D 与 A 隔着火成岩柱，它们也可能砂层是平面上连通的。因此，这次 TN 油田的圈闭储量计算可能还是算少了。

二、无井砂层内插方法的思路

TN 油田钻井少，中部探井又集中在中间地垒上，控制不了全区砂层的合理内插。加上火成岩在里面穿插，使我们判断岩性造成困难。因此，我现在提出采用“有井内插砂层与无井砂层内插方法的结合”的方法。在大多数砂泥岩剖面中，我坚信弱振幅区反映着泥岩，强振幅反映砂岩（有时极强的振幅可能反映火成岩或致密胶结砂岩）。利用积分地震道（即相对波阻抗），我们还是有办法作“粗略”的砂层内插。它虽然不如有井内插精度高，但是大方向不会错。它可以补充井网太稀的不足。

我建议的无井砂层内插方法步骤如下。

（1）参与无井砂层内插的地震资料必须作好保持振幅处理，并且从浅到深有较好的道均衡。

（2）目前 TN 油田的地震剖面基本符合这个条件。它的处理过程中可能去噪稍为过头，这对无井砂层内插还无大碍。

（3）先对地震 SEGY 记录作积分，得积分地震道剖面。它相当于相对波阻抗。

（4）记下波形的每个过零点，把相邻两个过零点之间的距离当成该层的厚度。

（5）统计地震振幅的分布（读取每个波峰的绝对值），一般取地震小振幅的平均值作为划分泥岩的分界线。取大振幅的平均值作为好砂岩的分界线。

（6）然后把三维地震道，按 SEGY 道序，按图 4～图 6 划分好砂岩，砂岩，粉砂岩，及泥岩。

这时划分好砂岩、粉砂岩及泥岩的 3 个门槛值十分重要，要掌握好。

三、理论模型实验

下面用理论模型来证明它的可行性。

图 4 上部 3 条曲线分别代表着理论子波，地下反射系数及声波速度曲线。可以看到，这个模型里以泥岩为主，夹着不少薄砂层，中央部分有几个厚的好砂层。下面 3 条曲线分别是理论合成地震道、积分地震道和声波曲线的积分地震道。

图 5 上方是合成地震道，中间是它的积分道，我们把它的负半周压白，就与地下声波模型道非常相似了。

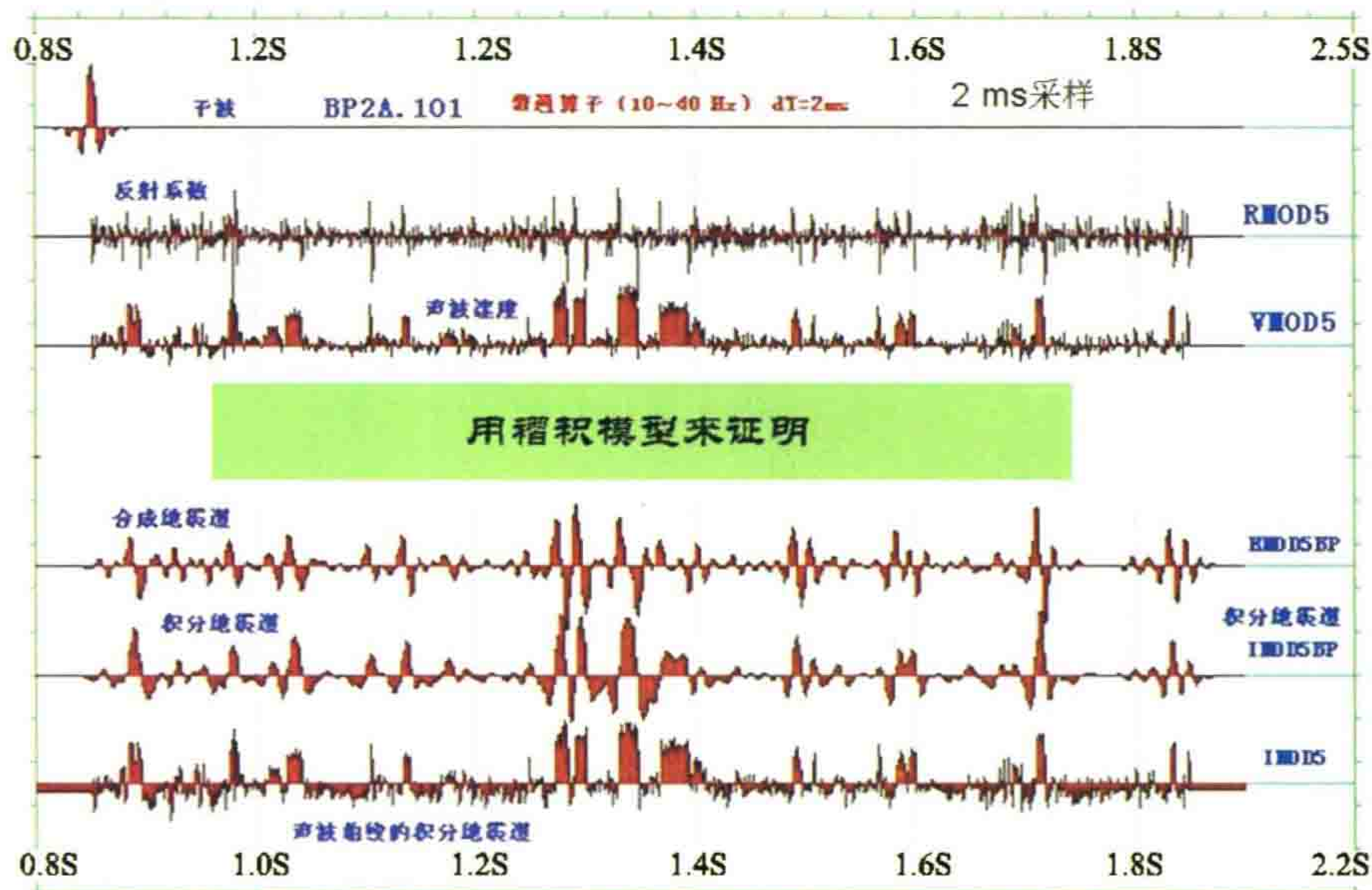


图 4　用褶积模型来证明积分地震道的重要性

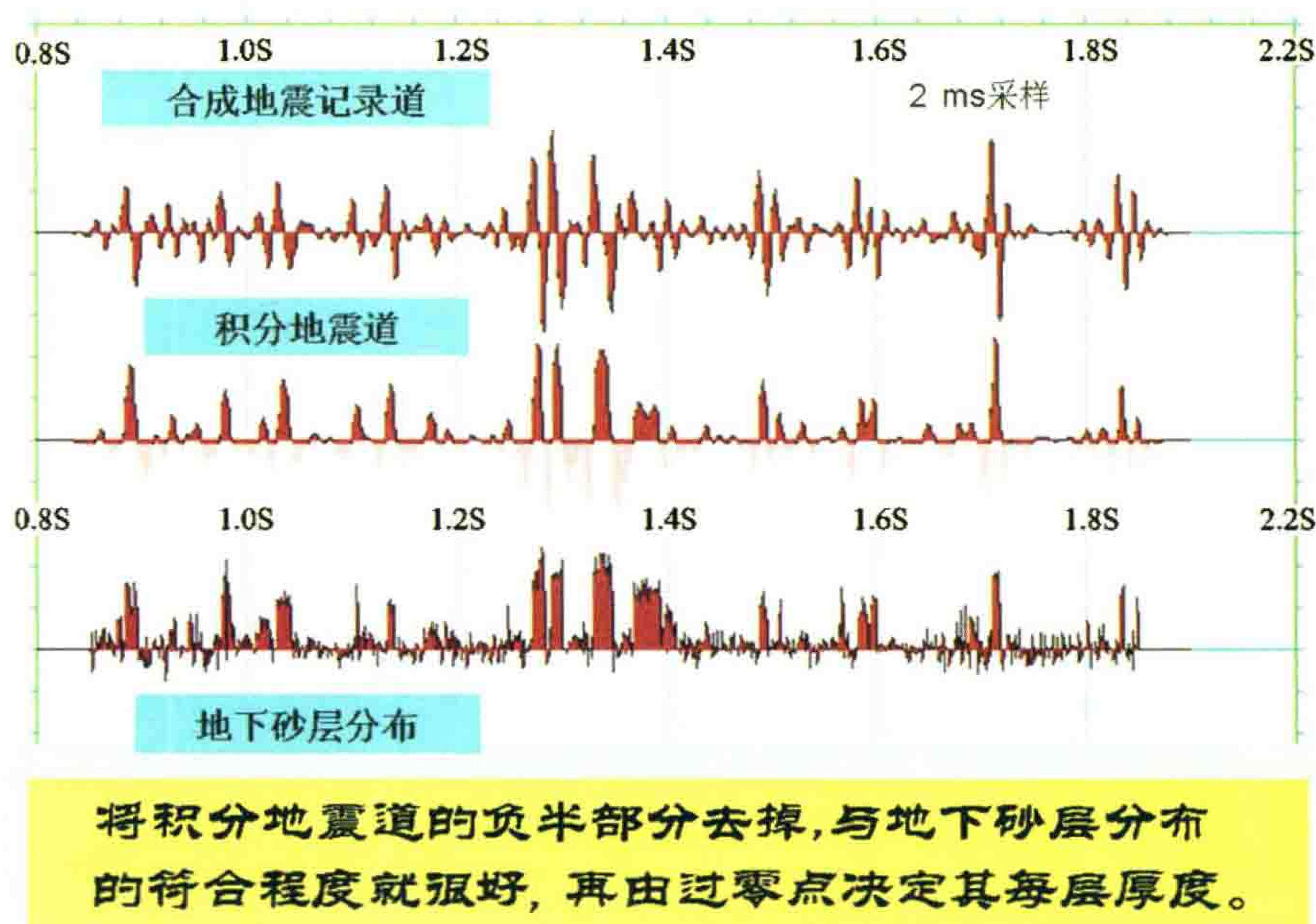


图 5　用积分地震道划分岩性的可行性

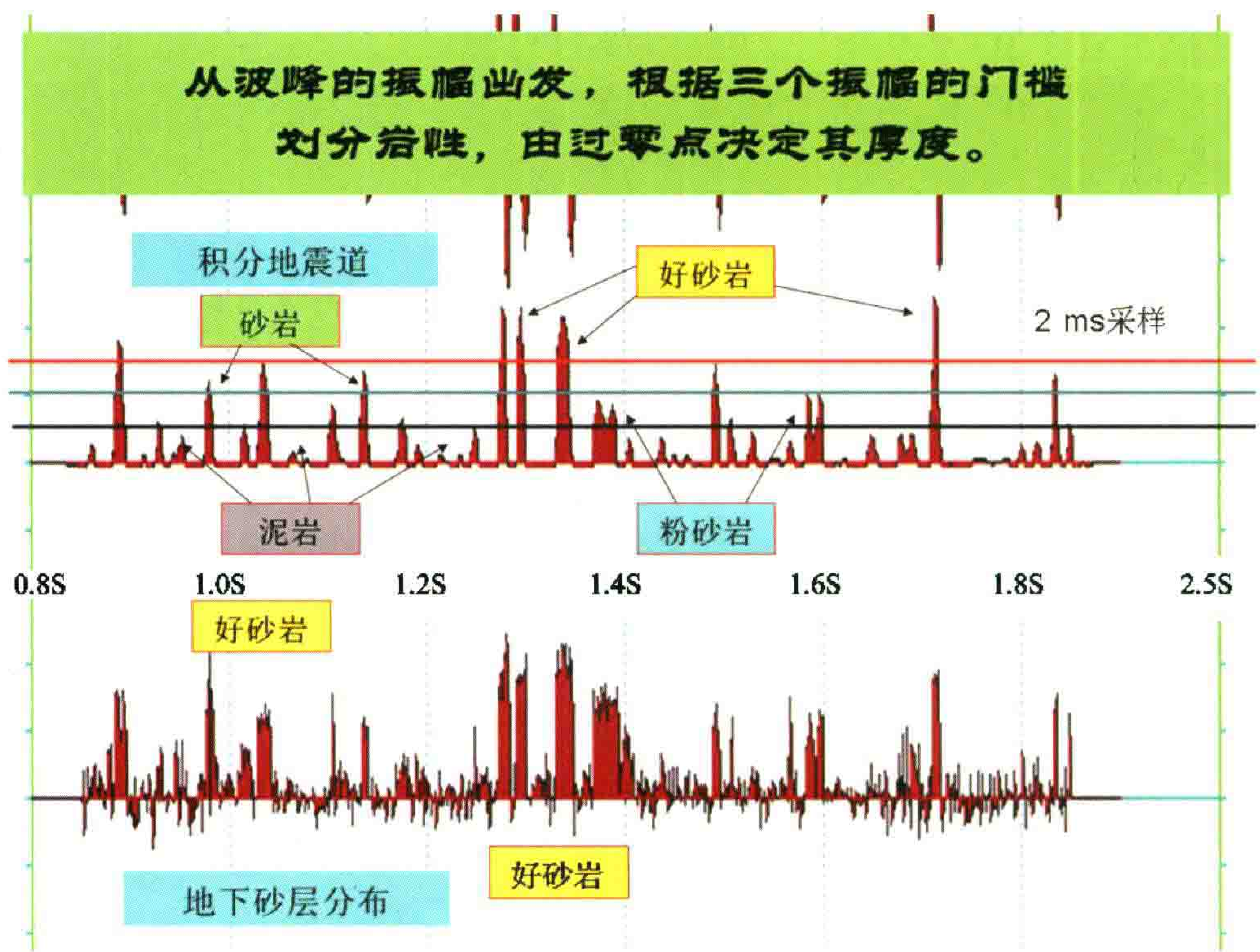


图 6　定 3 个门槛值划分岩性

图 6 表示，我们可以定 3 个门槛值，用积分地震道大致地划分砂泥岩的分布。

以上图 4～图 6 说明，根据积分地震道的数据作统计分析，可以大致地划分地层岩性。

但有时极强的振幅可能反映火成岩或致密胶结的砂岩。 TN 油田工区就有火成岩的分布，胜利油田有致密钙质砂岩的空隙度也很小，往往不是好储集层。此时，解释时要注意，要先统计工区或相邻工区的不同岩性不同孔隙度岩层的相对波阻抗值的分布范围，做细致的统计与解释，准确划分岩性，如图 7。

火成岩或致密胶结的砂岩的孔隙度变小(图 7 右边深蓝色的点子)，在我们的 TRAP-3D 岩性指数得分值就相应降为 1～2。而对于孔隙度小于 5%的火成岩，我们甚至可以认为它是非渗透层，岩性指数得分值可以给零(即与泥岩相当)。

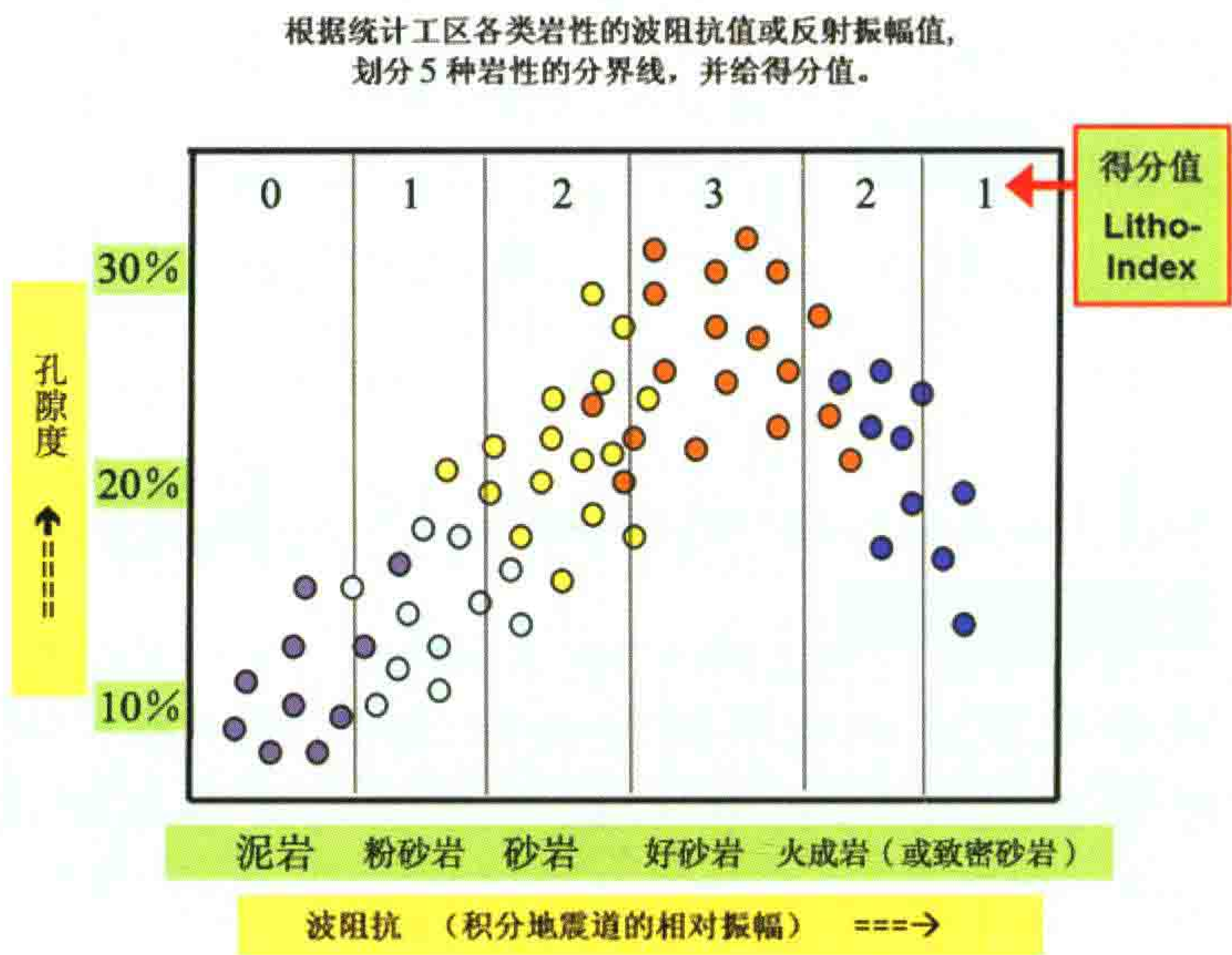


图 7　统计不同岩性的孔隙度与波阻抗的关系

TN 油田可能剖面里存在火成岩，见图 8、图 9。

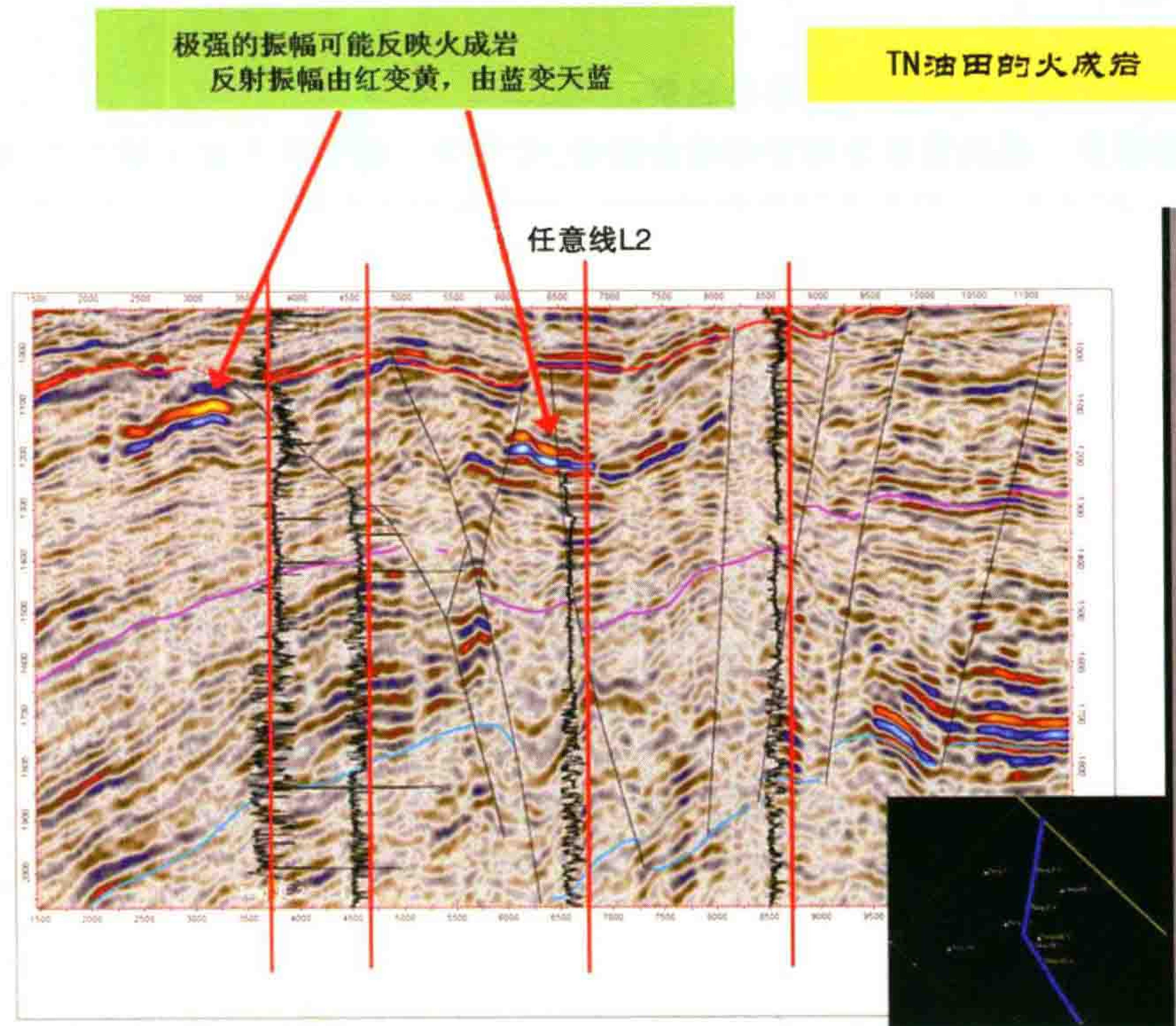


图 8　剖面里存在火成岩例 2

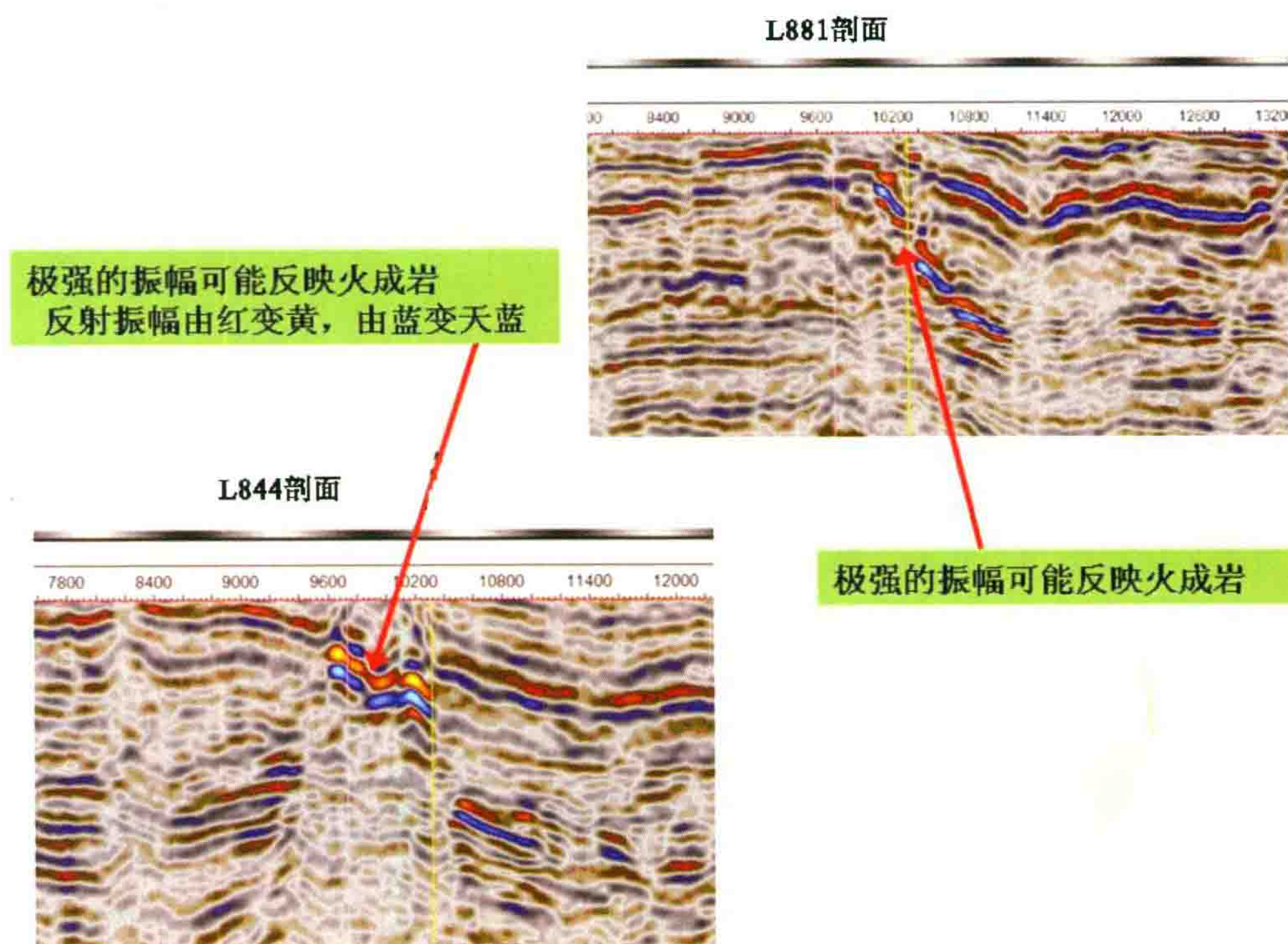


图 9　剖面里存在火成岩例 3

四、我的建议

最后把有井内插与无井内插两种结果结合起来。

它们二者各有优缺点。我的意见是把它们结合起来，即把有井内插与无井内插的 Litho-Index 结果以一定的比例加权相加，形成 Cube，然后再把断层插进去。例如权系数各为 50%时，把二者相加再除以 2(断层在此后再加)。

有了无井砂层内插后，今后我的 TRAP-3D 程序也可以在没有打井的工区作圈闭预测了。这很重要。

这个无井砂层内插的方法其实就是用波阻抗判断砂岩分布的原理，不过我们用的是积分地震道，更为简单。

文章编号 305-1



怎样正确对待分形、分维技术

自从20世纪90年代SEG的前主席古比约先生到中国来介绍分形、分维以来，大家怀着十分好奇的心理，期待它能给物探技术带来新的奇迹。

1993年，《石油消息》报刊编辑部组织了一次“对分形等新技术的笔谈会”。笔谈创导人蒋其恺同志写第一稿。该文的中心思想是健康与良好的，但文中引用了国外某学者的一句夸张的话：“明天谁不熟悉分形，谁就不能被认为是科学上的文化人”。后来许多物探人相继载文，称说分形技术可以帮助地震勘探查明断层，可以用分维技术提高地震分辨率，可以解决油田开发中的非均质开采问题，用分维数还能求吸收系数直接找油等等。



后来我学习了分维，并且自己也编了一些程序加以计算论证，开始对分形、分维有了些肤浅的了解。当我发现事实并非像人们宣传的那样的时候，就斗胆写了那篇《石油消息》1993年10月6日的短文，说出了我对“分形技术”的看法，见附录1。

本文系统地阐述了我对分形分维技术的看法，我认为它只是对复杂事物的一种“描述方法”，而不是“预测方法”，更不是真实的“写真方法”。

此文1996年2月发表于《石油地球物理勘探》第1期，作者李庆忠。

摘　要

分形、分维技术是一种研究复杂对象的良好工具，已引起了人们的重视。但由于一些人对这个新的数学工具的实质认识得不够清楚，出现了一些偏向。例如，有的人想用它来解决过去复杂油层开发过程中的微观现象（即非均质性问题），有的人用分维数来找油、找气以及预测裂缝发育带，甚至用分形提高地震勘探的分辨率。笔者认为，对上述这些问题应该重新加以考核，注意不要夸大其解决问题的能力。一个分形集是由其自身性质决定的，并非任何复杂对象都具有分形性质，不了解这一点，就会陷入误区。

关键词

地球物理勘探　分形　分维　储层预测　分辨率

前言

从1991年开始，我国有人开始尝试把分形、分维技术应用到石油勘探领域，作出了一些有益的探索。1993年，《石油消息》编辑部组织了一次“对分形等新技术”的笔谈会。应该说，组织这样的笔谈讨论会是很有意义的。但是有人在笔谈会的文章中不恰当地引用了国外一位学者的一句夸张的话：“明天谁不熟悉分形，谁就不能被认为是科学上的文化人”。在笔谈会文章中还有的人认为“分形技术”能够解决过去搞不

清的复杂油层开采、开发过程中的微观现象(即非均质性问题),有的人认为分形、分维已经可以用来追踪含油气砂层、预测小断层及隙缝发育带的位置和形态,甚至认为分形已经可以用来提高地震勘探的分辨率等等。

我认为,今天我们应该重新思考这些问题。本文不想否定分形、分维是一种有用的工具,只是想指出:我们不能夸大其解决问题的能力。笔者对于把分形、分维技术介绍到物探领域中的先驱者是充满敬意的,即便是我们指出了他们在实践中某些做法不恰当,或某些结论不正确,也不能否定他们先行工作的价值。本文的根本目的在于使分形、分维技术能够得到正确的应用和健康的发展。

我顺着笔谈会的思路,找了一些有关分形技术的书和参考文献,学习了一下,并且自己也编了一些程序加以计算论证,开始对分形、分维有了些肤浅的了解。当然,凭我这些初步的实践,很难有什么"真知灼见"。但是,当我发现事实并非像人们所说的那样,就斗胆写了一篇短文[1]。我在那篇文章中首先肯定了分形、分维技术是一种有用的工具。同时指出,"分形理论"只是提供了一种对客观复杂事物加以"描述"的"理想化"的估计,并不等于"客观事实"。有人夸大了"自相似性"假设,认为世界上复杂的事物中都有其自相似性,例如太阳系与原子结构就很相似。但是原子结构与分子结构就相差甚远,分子结构与细胞构造极不相似,细胞与生物个体更不相似。怎么能够用简单的"自相似"假设到处套用呢?又如我们可以设想一下,如果有谁用分形技术把一张百万分之一的地形图上的海岸线按照分形理论内插出一张一万分之一的海岸线地形图,然后根据它去指挥一次海军登陆作战,那么这次战役恐怕将会出很大的洋相。再如在研究油层的"非均质"现象时,利用分形技术可以在只有少数钻孔条件下,对"非均质储集层"作出一定的估计与推测,从而迅速作出油田的初步开发方案,但这绝不等于说"非均质"问题已经解决。如果在原来的开发过程中按原来分形预测的结果去部署配采、注水,则也一定会发现不少与事实不符的情况。至于对裂缝系统的研究,可能更适合利用分形技术,因为裂缝与大小断层往往有某种相似性。但是,断裂的产生与岩石本身在地应力条件下的破裂强度有关,岩石的破裂强度又不会因为几何尺度的大小而相应地缩小或放大,所以,大小断裂的自相似性也就成了问题。由此可见,关于怎样将它应用到石油工业上来,以及在地球物理勘探领域中如何正确理解分维数的具体物理意义等问题,我认为值得探讨。

鉴于最近在一些期刊和会议上仍然不断有人用"分维数"来追踪含油气砂层的文章[2],以及用"分形内插"来提高地震勘探分辨率的文章[3],此外还有不少油田也在用分维数当作一个找油或找裂缝的一种指标[4][5]。因此,有必要对这些文章的论点进一步展开讨论。

一、什么是分形技术

为了说明问题,应该首先把"什么是分形"作一个简单的介绍。英国布里斯托大学的肯尼思·法尔科内(K. J. Falconer)教授1990年写的《分形几何——数学基础及应用》是一本好书[6]。虽然这本书写得比较全面而且通俗,还附有许多容易理解的插图,但对于纯数学没有多大兴趣的人来说,它还是显得数学方面的论证太多了。为了说明分形是怎么回事,我在此把自己所理解的分形几何,尝试用最通俗的语言对它作些介绍(本文列举的图1到图20都出自该书)。

(一)分形几何学的基本概念

经典的欧氏几何学只研究直线、矩形、圆、三角形、圆锥面、锥体、椭球体等规则的形状,而对于自然界中稍为复杂一些的图形,就没有能力描述它。20世纪70年代后期发展起来的分形几何学(Fractal Geometry)相对于欧氏几何学来说,是一次革命性的突破。分形几何可用来描述极复杂的几何图形。

"分形"一词是由它的创始人B. B. Mandelbrot在1980年从拉丁文中Fractus(意为断裂)一词演变来的,主要用来描述一些非常不规则的对象。

一个分形集应具备以下几个典型性质。

(1) 通常它本身的结构在大小尺度上有着某种“自相似”形式(有的严格地相似,也有的只是近似的、或者统计的相似性)。

(2) 当图形比例不断缩小时,它可以有任意小的细节。

(3) 它的“分形维数”大于它的“拓扑维数”。

(4) 在大多数令人感兴趣的情形下,它可以用非常简单的方法定义,并可以用迭代计算产生其图形。

(5) 分形的结果是倾向于“解释性”的,而非“预言性”的(此项是笔者根据文献6的原意补充的)。[6]

很显然,如果不符合以上这些性质,就不能当作分形来研究。我认为本文所提到的一些文献中出现的失误都是因为对这些性质缺少认真分析所造成的。

(二) 分形图形的典型例子

下面列举一些典型的分形图形。

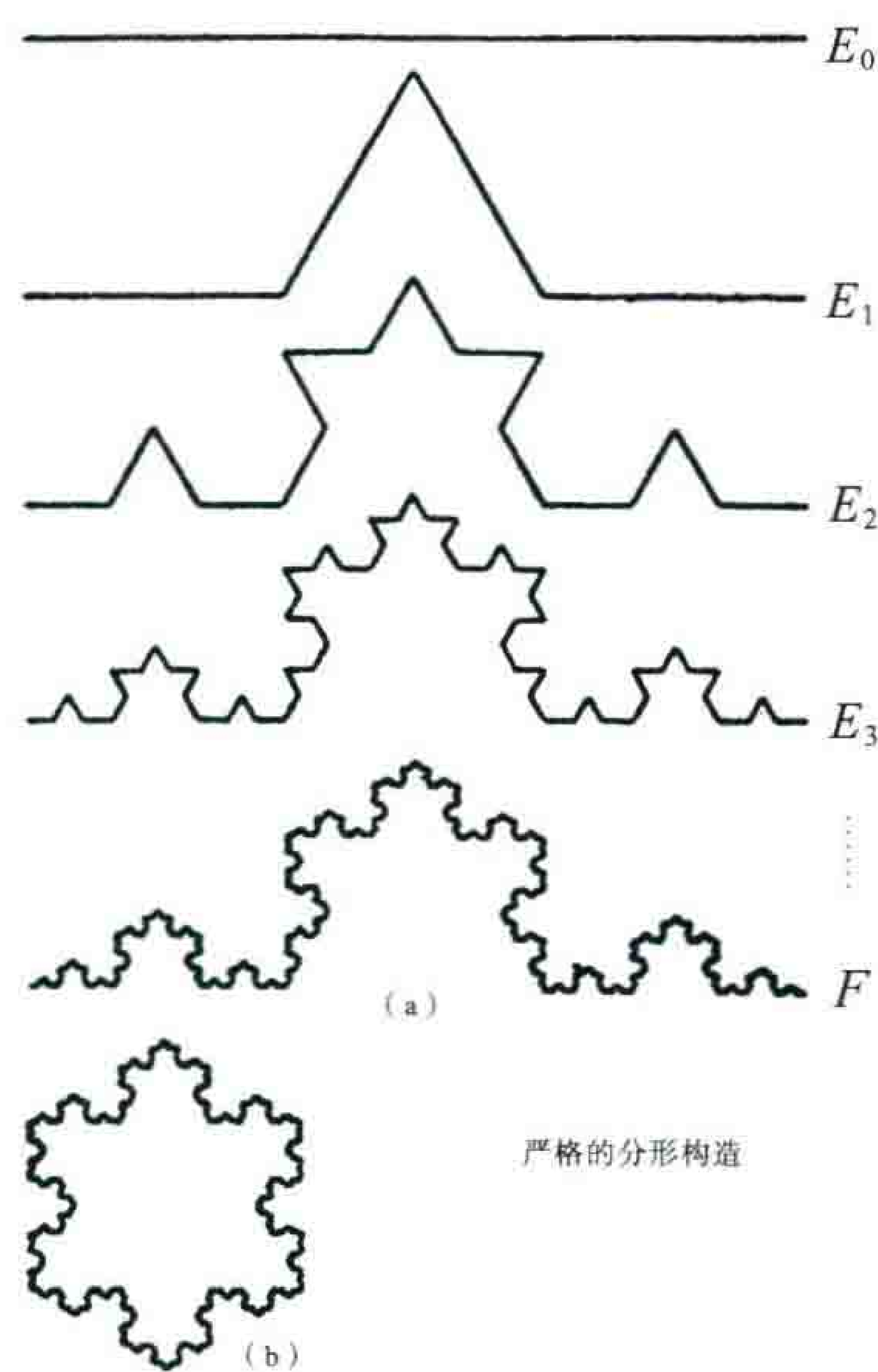


图1 Von Koch曲线F的构造(a)和由三段Von Koch曲线相接而成的一朵雪花(b)

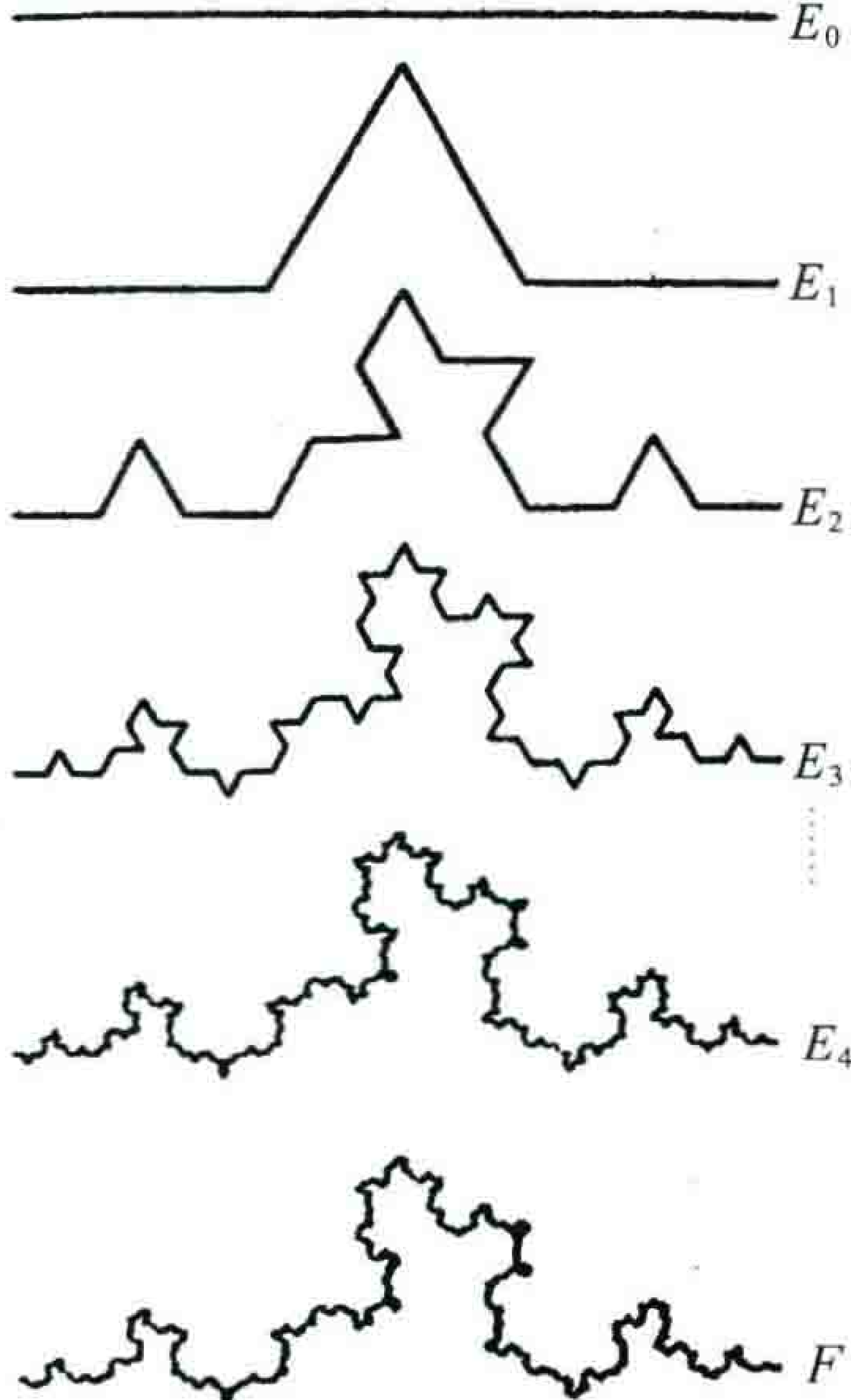


图2 随机Von Koch曲线的构造

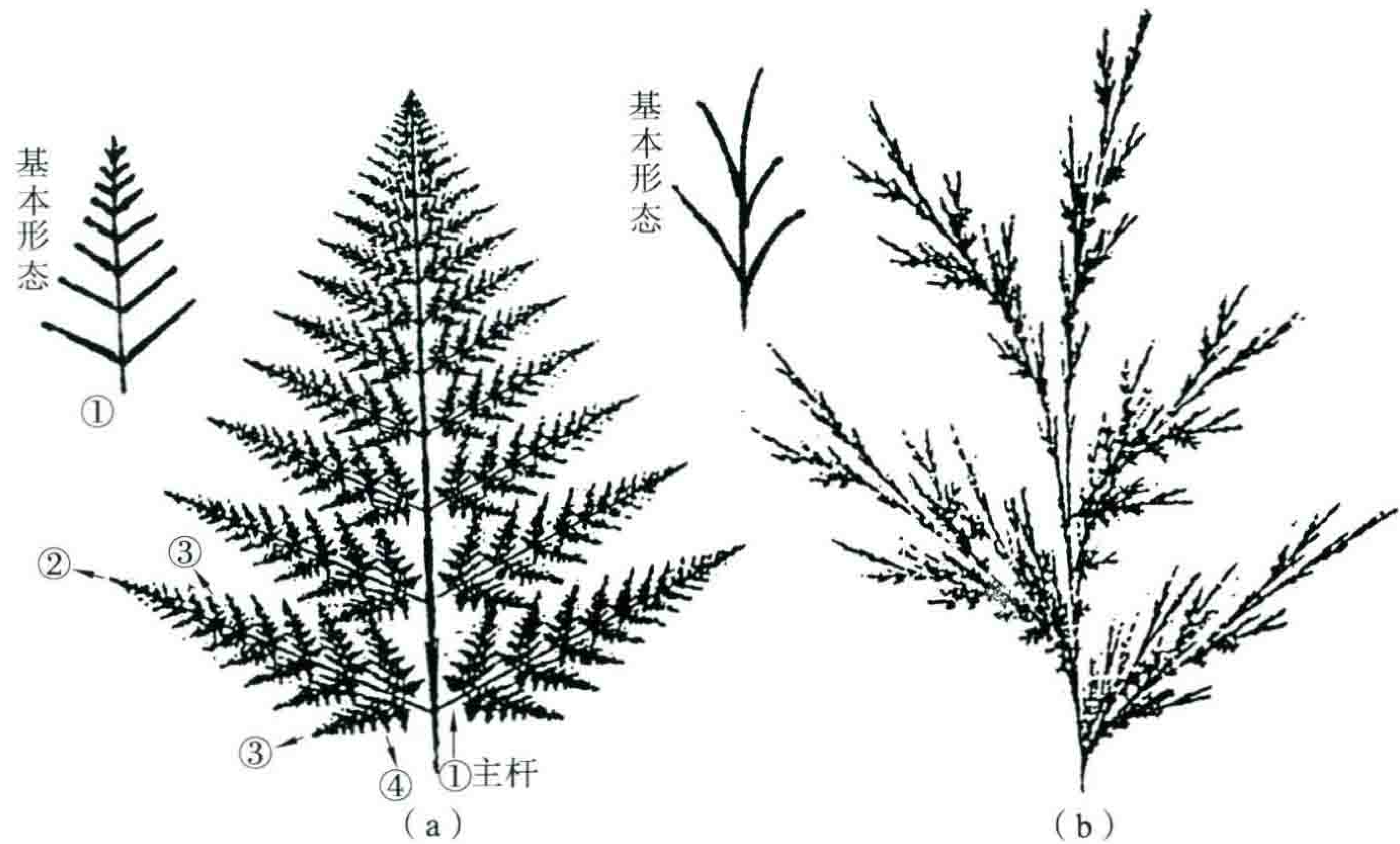


图3 分别用4次仿射变换生成的羊齿叶(a)和6次仿射变换生成的青草(b)

图1(a)是Von Koch曲线F的构造。第一步,在一条直线上取其1/3长度之处改换成一个三角形,变

成 E_1。第二步，再在每个直线段上改成其 1/3 长度的三角形，变为 E_2。如此反复加密，直至最后无穷多次，成为分形集 F。图 1(b)是连接在一起的三段 Von Koch 曲线，形如一朵雪花。它的细节有严格的自相似性。

图 2 是 Von Koch 曲线的随机图形。它是在图 1 的基础上，采用“随机生成”的办法构成，即构造的每一步都掷一枚硬币，来决定一对新的直线段(三角尖)在曲线上的方向，于是曲线变复杂了。这张图有些像海岸线了，它只有“统计上的自相似性”。

图 3(a)像一幅羊齿叶的图，它是由一个 8 对小叶片的基本形态用四次“仿射变换”构成的。我在左上角画出了它的“生成元”(或称为“基本图形”)，并标出了四次“仿射变换”的位置及方向箭头。

图 3(b)是 6 次仿射变换下的不变集，它很像一棵小草。左上角便是它的“生成元”。

图 4 表示了 3 种图形的变换方法：可以使用“全等变换”“相似变换”或者“仿射变换”构成。采用仿射变换时，可以将图形压缩、拉伸及旋转，还可作多次拉伸、弯曲与折叠，如“马蹄形变换”(类似面包师的拽面动作)(图 5)。

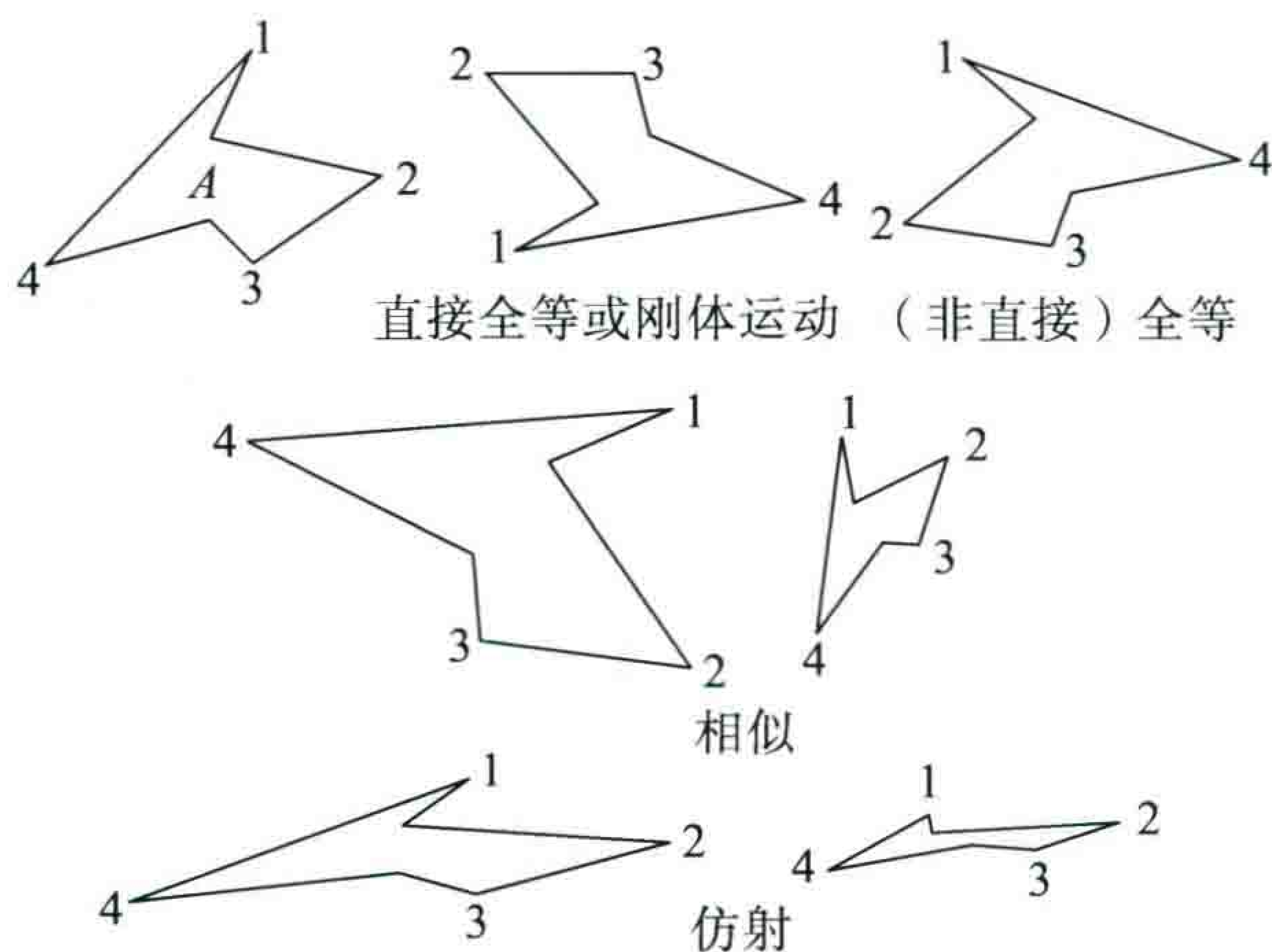


图 4 对集 A 各种变换的作用

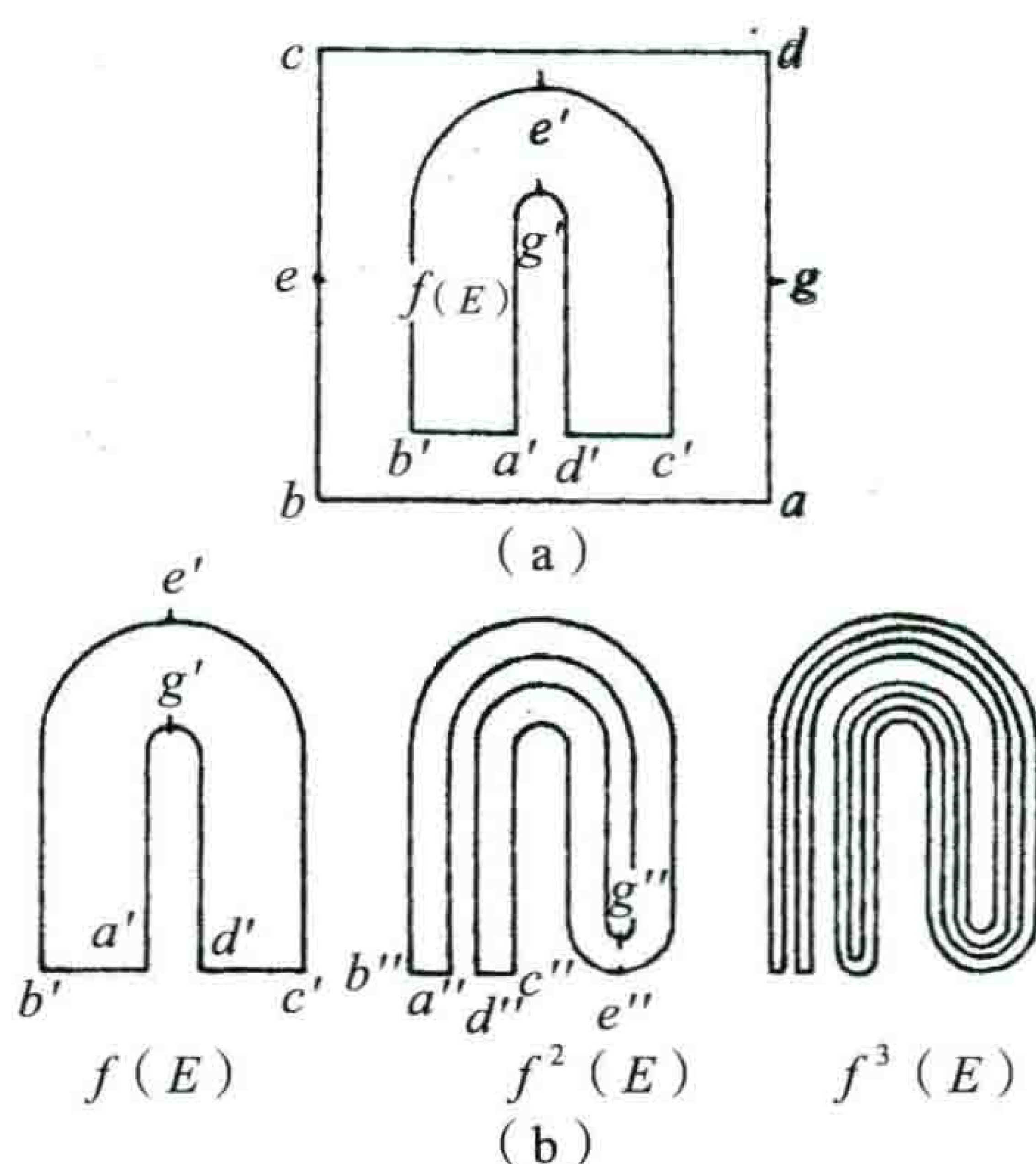


图 5 马蹄形映射

(a) 经拉伸和折叠正方形 E 变换成马蹄形集 $f(E)$，a、b、c、d 分别映射出 a'、b'、c'、d'

(b) 在 f 的作用下，E 的迭代形成了一个局部是直线与康托集乘积形式的集

图 6 是“分形射影”的例子，可以用投影的办法构成各种新的图形，就像太阳光照射下形成的阴影那样，三维物体也可以转换成二维。图 6 上部为经典集在平面上的射影，曲线“典型地”有维数为 1 的射影，而曲面和立方体具有正面积的维数为 2 的射影。下部为分形集到平面上的射影，若 $\dim_H F1 < 2$ 及

$\dim HF_2 > 2$，则“典型地”F_1 射影的维数等于 $\dim HF_1$（且有零面积），F_2 的射影的维数为 2（且有正面积）。

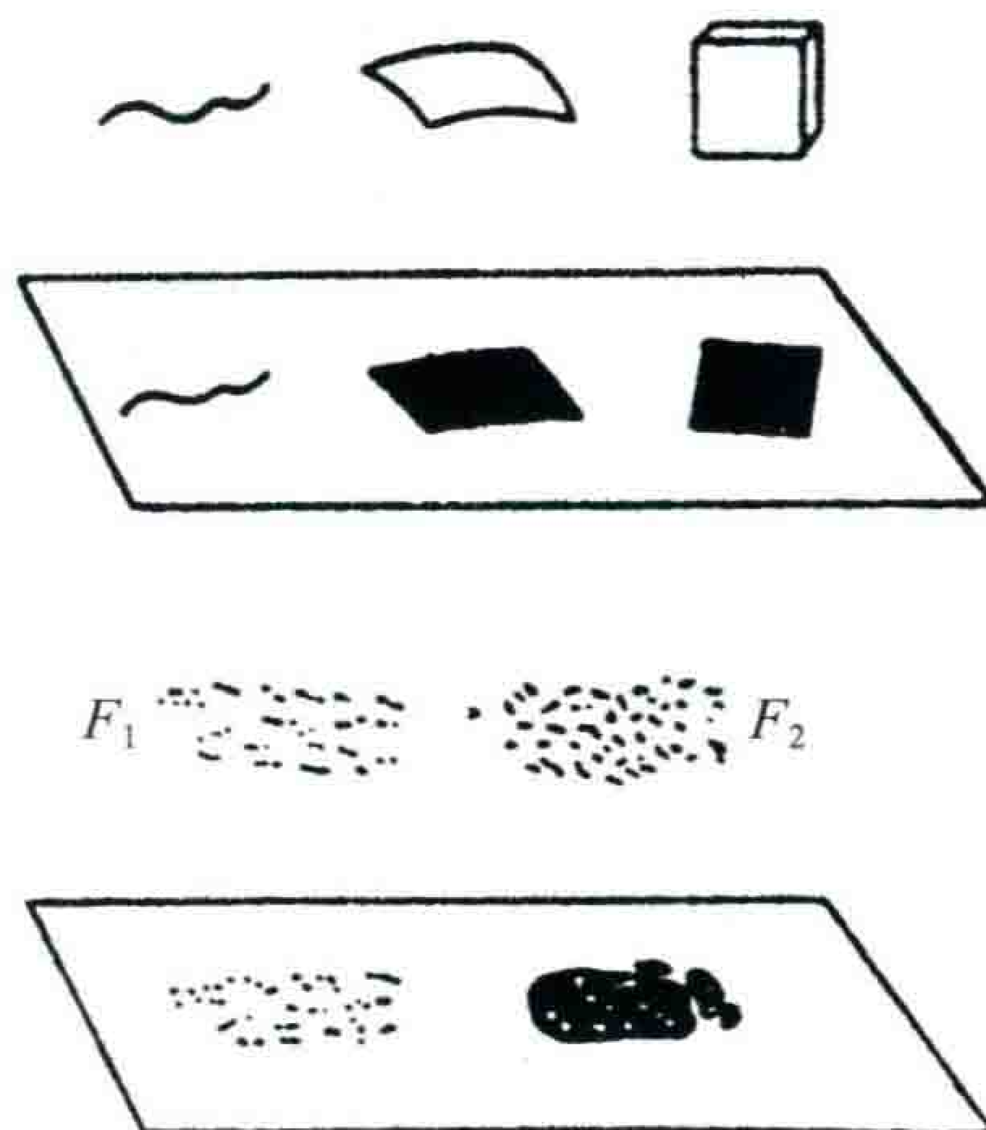


图 6　分形的射影

还可以把两个分形集求其“乘积”，例如两条一维空间中的直线段“相乘”后所得乘积便是一个平面（图 7）。维数低的可以变成高维数的图形。还可以采用类似“加法”，把两个分形集进行“相交”成为“交集”（图 8），使图形变得更复杂。

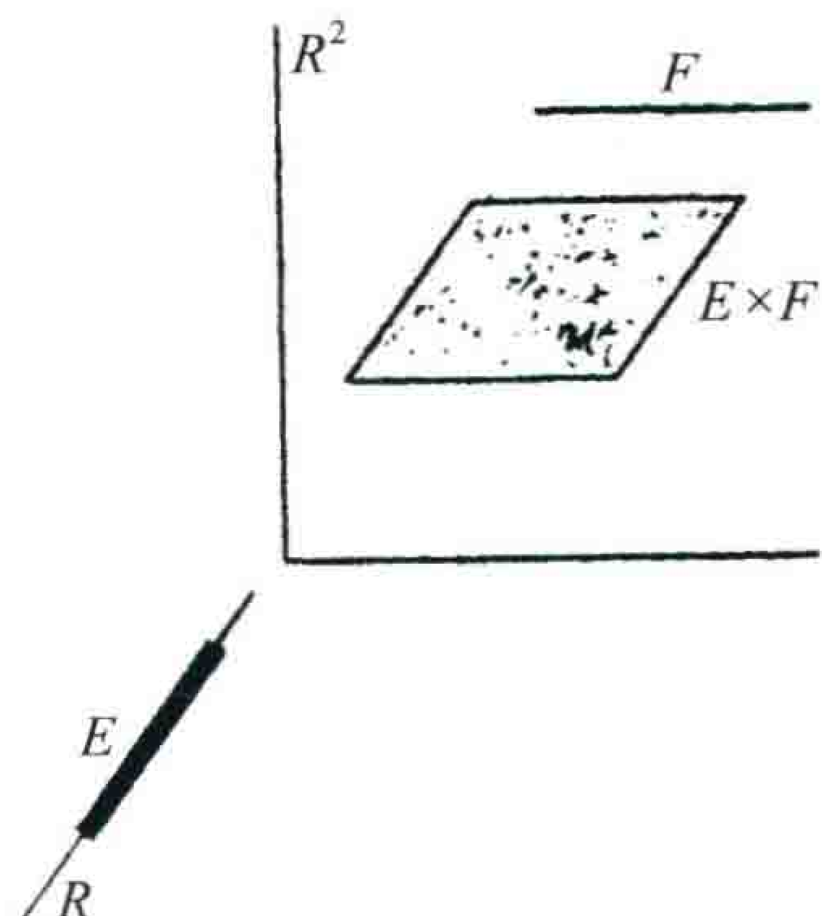


图 7　分形的乘积

R 中的单位区间与 R^2 中的单位区间的笛卡尔乘积

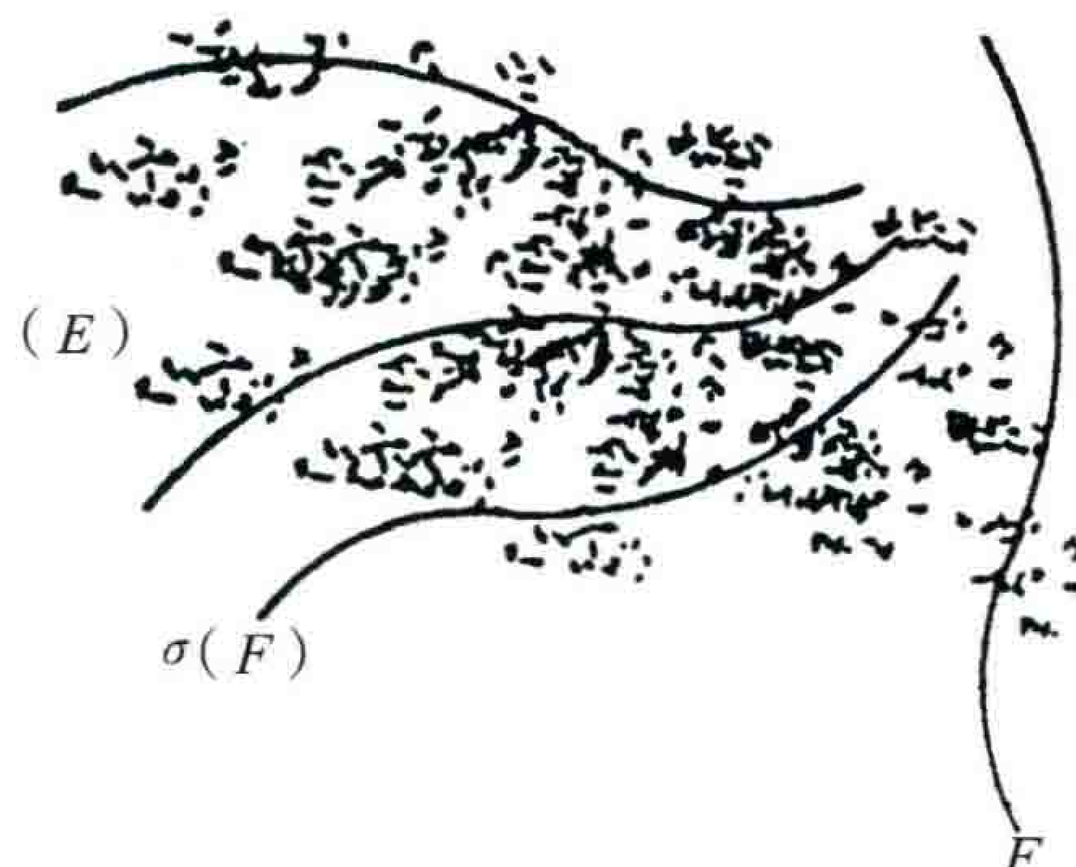


图 8　两个分形集的交集

E 和 F 作各种各样的全等变换形成的交集 $\sigma(F)$

我想人们看了这几张图形后，对分形几何一定会感到它十分有用。我首先想到的是，用它在计算机屏幕上制造复杂多变的图案，甚至可以灵活地实现“电脑创意”的动画片。因为它只要用少量的参数（或生成元），便可以生成很复杂而精细的图形。

（三）分维数的概念

为了研究分形集的几何性质，传统的“长度”“面积”和“体积”的概念已经不够用了。在分形几何学中主要采用了“分维数”的计算方法。所谓“分维数”是指在更深、更广泛的意义上定义 n 维空间中超越“长度”“面积”和“体积”旧概念的新度量。它度量的是一个分形集“充满空间的程度”。例如，一个分形集图案的分维数为 1.6，是指它在空间的分布比一维空间复杂一些，而比二维空间简单一些。传统几何学（欧几里得空间）中的维数只能是整数，而在分形几何中可以是任意正实数。

计算“分维数”的方法有很多，因此，不同人采用不同计算方法所得的计算结果可能是不同的。但总的要求是：分维数必须能反映在不断缩小直径的很小的比例下，去观测一个分形集，找出这个集的一个代表“维数”，使它能够反映出该图形的复杂程度，或“不规则程度的量度”，或“充满空间的程度”。

（四）计盒维数

最典型而容易理解的求分维数的方法是“计盒维数法”(Box Counting)（图 9）。对一个平面中的分形集图形 F 来说，可以用宽度为 δ 的正方形盒子打成方格网来覆盖这个图形。数一数共有多少个方格套上这个图形，然后逐步缩小方格的宽度 δ，每次都来数一数覆盖这个图形的方格数目 N，于是可以用下式：

$$\dim_B F = \lim_{\delta=0} \frac{\log_{10} N_\delta(F)}{-\log_{10}\delta} \tag{1}$$

估计出其盒分维数。几乎所有的分维数的定义都可以采取类似的形式。即式(1)的右边是一个 $\delta \to 0$ 的极限值。在实际计算时，当然不能取无限小，因为 $\delta \to 0$ 时，我们将无法数它的方格数目了。

此外，我们常常使用一种双对数坐标，如图 10 所示，即用 $\log_{10}\delta$ 作横坐标，用 $\log_{10} N_\delta(F)$ 当作纵坐标。改变 δ 时，把每次计盒数 N 的对数值点成点子。如果这些点子在某一个范围内呈直线，我们就说，此直线段的斜率就是分形集 F 的一个“分维数”。

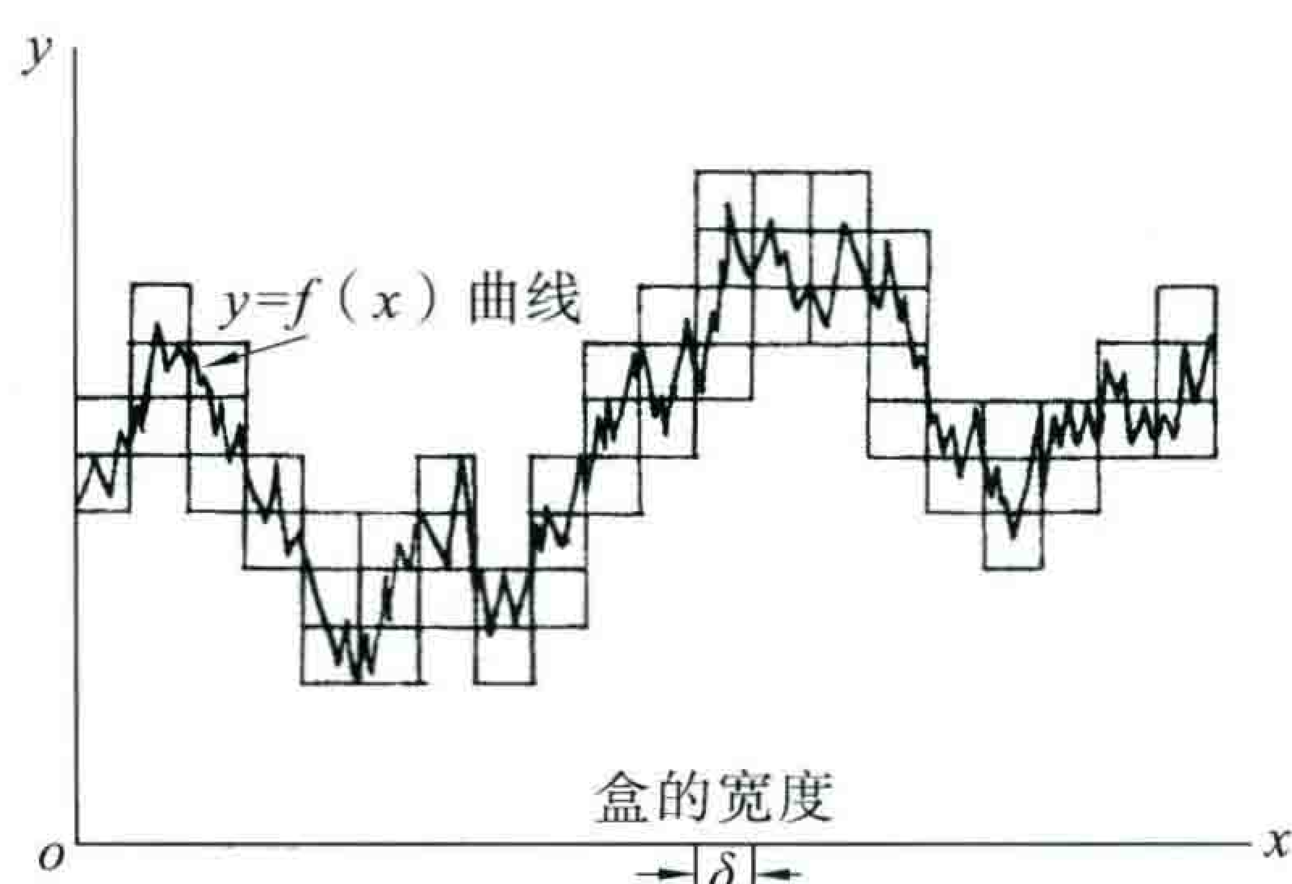


图 9　用计盒数方法算分维数

在宽度为 δ 的区间上面的柱集内与 f 的图相交的网正方形个数近似等于 f 的变化范围，对这个数求和给出了 f 图的盒维数的估计

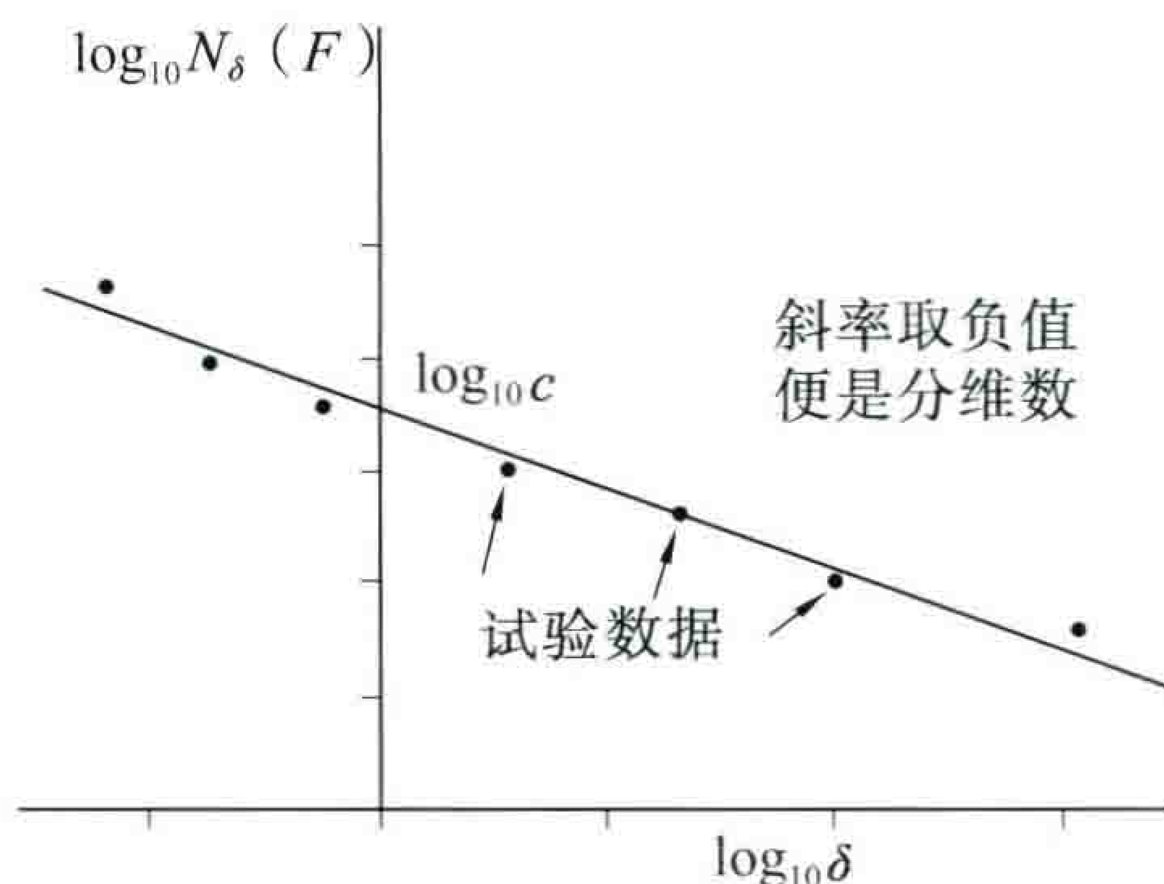


图 10　在服从幂定律 $M_\delta(F) \sim c\delta^{-s}$ 的假定条件下对集 F 维数的经验估计

横坐标 $\log_{10}\delta$ 为盒的宽度的对数；纵坐标 $\log_{10} N_\delta(F)$ 为计盒数目的对数

图 2 下方 Von Koch 曲线的计盒分维数为 $\log_{10}4/\log_{10}3 \approx 1.262$，用它描述一条海岸线是十分具有代表性的，它是随机分维的结果。将这个例子具体应用到研究英格兰的海岸线，发现在 20 m 到 200 km 范围内的 δ 值，其 N 的确服从幂定律：

$$N_\delta \approx 常数 \times \delta^{1.2}$$

即英格兰的海岸线的分维数约为 1.2。这个应用分形的实例使分形几何的名声大振。

计盒维数的计算方法可以有好几种，参看图 11。其中 δ 可以是方格网的边长，也可以是圆的直径，也可以是不规则形状的最大直径。显然，不同的方法求得的分维数可能是完全不相同的。当然，也可以把计盒维数推广到 n 维空间中去。此时，δ 便是 n 维空间中的一个小区域（直径为 δ 的范围）。例如在三维空间

中，δ 便可以是一个立方体的盒子或者球体。在一维空间中，δ 便是一个线段的长度。$N_\delta(F)$ 便是以 δ 为直径、能够覆盖 F 集的最少盒数。

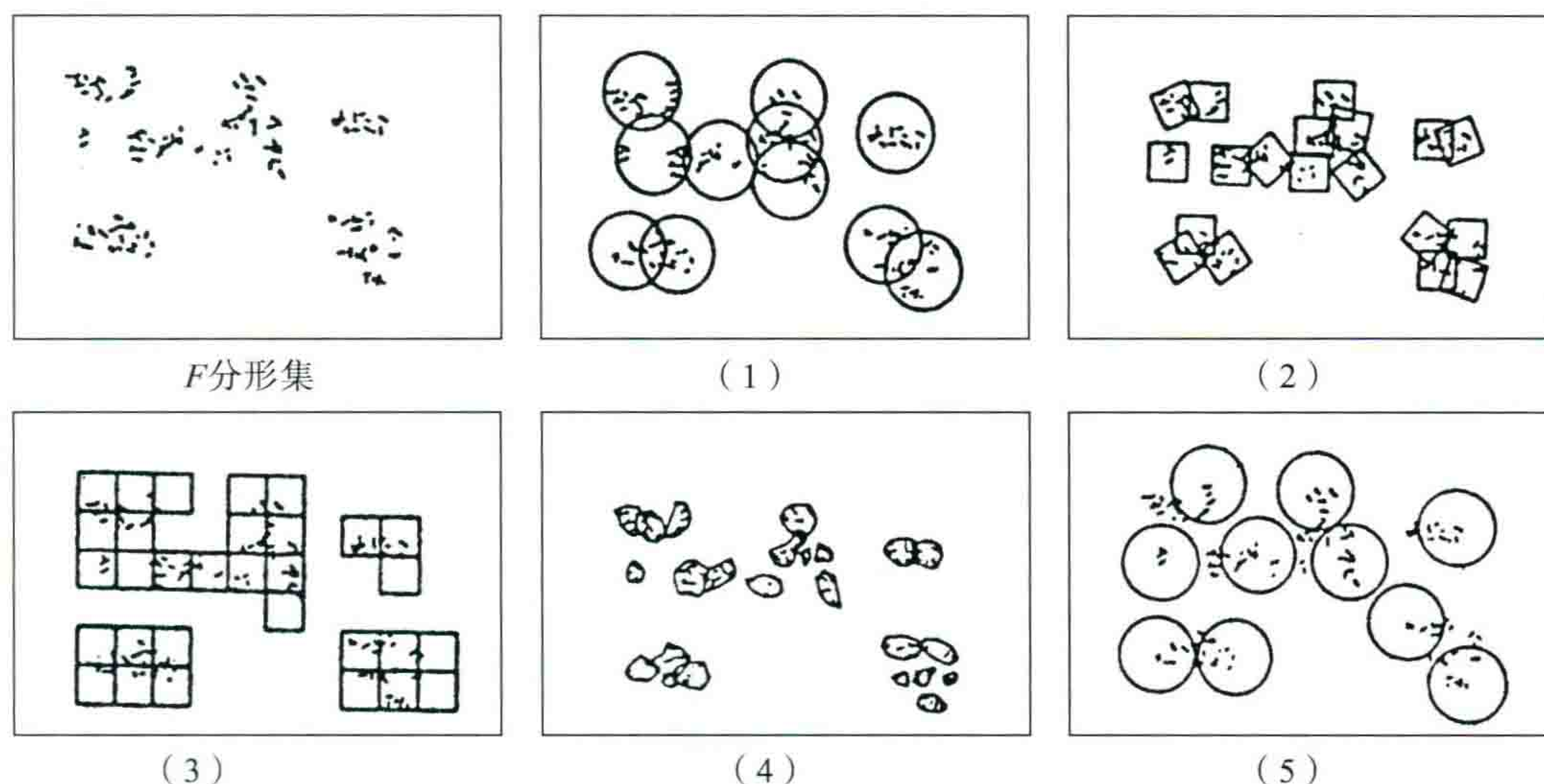


图 11　求 F 的盒维数五种方法

数 $N_\delta(F)$ 可以取为：(1) 覆盖 F 的半径为 δ 最少闭球数；(2) 覆盖 F 的边长为 δ 的立方体的最少个数；(3) 与 F 相交的 δ 网立方体的个数；(4) 覆盖 F 的直径最大为 δ 的集的最少个数；(5) 球心在 F 上，半径为 δ 的不交球的最多个数

（五）相似维数

还可以根据图形的自相似性质计算其分维数，称为“相似维数”。即如果一个分形集 F 由 m 个与它相似且相似比为 r 的部分组成，则相似维数为：

$$\dim_S(F) = -\log_{10} m/\log_{10} r \tag{2}$$

例如图 1 中的 Von Koch 曲线是由 4 个比例系数为 1/3 的与它相似的形状所组成（图中 E_2，E_3 最明显），所以其分维数为 $-\log_{10}4/\log_{10}(1/3)=\log_{10}4/\log_{10}3\approx1.262$。

这里举两个最明显的例子。譬如任意一条直线，将它取 5 等分，每分段当然与整体相似，那么它的维数是 $-\log_{10}5/\log_{10}(1/5)=1$。显然，它是一维的。又如有一个正方形，把它一分为四，当然它便是由 4 个边长为 1/2 的正方形所组成。因此正方形的维数便是 $-\log_{10}4/\log_{10}(1/2)=2$。因此，它是二维的。但这种“相似维数”的计算方法只有对严格自相似的集才有效，因此不具有普遍性。

（六）豪斯道夫维数与豪斯道夫测度

更具普遍意义的分维数定义是建立在“豪斯道夫测度”概念的基础上计算出来的豪斯道夫维数（Hausdorff dimension），它可适用于任意形式的分形集上。豪斯道夫维数对理解分形几何的数学原理很有用。所谓豪斯道夫测度便是推广了的、在分数维中广义的长度、面积或体积的量度。它的数学表达如下。

如果 U 为 n 维欧几里得空间 R^n 中任何非空子集，则 U 的直径定义为：

$$|U| = \mathrm{Sup}\{\,|x-y|:x,y\in U\,\} \tag{3}$$

即 U 内任意两点距离间的最大值。式中 Sup 为上确界之意。

如果 $\{U_i\}$ 为可数（或有限）个直径不超过 δ 的集构成的覆盖 F 的集类，即：

$$F\subset\bigcup_{i=1}^{\infty}U_i$$

式中：$\subset$ 是“包含于”之意；$\cup$ 是“集的和”之意。对每一个 i 都有 $0<|U_i|\leqslant\delta$，则称 $\{U_i\}$ 为 F 的一个 δ 覆

盖。

设 F 为 Rn 中的任意子集，S 为一非负实数，对任何 $\delta>0$，可定义测度 H 为：

$$H_{\delta}^{S}(F)=\inf\left[\sum_{i=1}^{\infty}|U_i|^{S}:\{U_i\}为F的\delta覆盖\right] \tag{4}$$

式中 inf 为下确界之意。考察所有直径不超过 δ 的对 F 的覆盖，并试图使这些直径的 S 次幂的和达到最小。实际上，当 δ 减少时，能覆盖 F 的集类是减少的，所以下确界 $H_{\delta}^{S}(F)$ 随之而增加，且当 $\delta\to0$ 时趋于一极限值，记为

$$H^{S}(F)=\lim_{\delta\to0}H_{\delta}^{S}(F) \tag{5}$$

对 R^n 空间中的任何子集，这个极限都存在，但极限值可以是(并且通常是)0 或者是∞，如图 11 所示。这个 H^S 便是 S 维豪斯道夫测度。可见，它是推广了的长度、面积和体积等类似的概念。例如

$$H^{n}(F)=C_n\cdot \mathrm{Vol}^{n}(F) \tag{6}$$

式中，常数 $C_n=\pi^{\frac{n}{2}}/2^n\cdot(n/2)!$。也就是说，$C_n$ 是直径为 1 的 n 维球体的体积。式(6)可以理解为分形集在 n 维空间中“总体积”的定义。例如，当 $n=2$，若 F 为一光滑的曲面，则 $C_n=\pi/4$，且有 $H^2(F)=(\pi/4)\times$ AREA(F)，表示其面积；而当 $n=3$ 时，则 $H^3(F)=(\pi/6)\times\mathrm{Vol}(F)$，表示其体积。

众所周知，在作比例放大时，对一维的情形，当比例放大 λ 倍时，曲线的长度增长 λ 倍；对二维的情形，面积便要被放大 λ^2 倍；对三维的情况，体积便要被放大 λ^3 倍。所以由式(6)可推知，一个 S 维的豪斯道夫测度的分形集放大 λ 倍时，其广义的“体积”将被放大 λ^S 倍。这个比例性质也是分形理论的基础之一。

那么，什么是豪斯道夫维数呢？让我们来分析式(4)，对任何给定的集 F 和 $\delta<1$，$H_{\delta}^{S}(F)$ 对 S 是不增的。由式(5)，$H^S(F)$ 也是不增的。因此，若 $t>S$，且 $\{U_i\}$ 为 F 的 δ 覆盖，我们有

$$\sum_i|U_i|^t\leqslant\delta^{t-s}\cdot\sum_i|U_i|^s \tag{7}$$

取下确界，得

$$H_{\delta}^{t}(F)\leqslant\delta^{t-s}\cdot H_{\delta}^{s}(F)$$

令 $\delta\to0$，可见当 $t>S$ 时，若 $H^S(F)<\infty$，则必然有 $H^t(F)=0$。所以图 12 表明存在着一个 S 的临界点，使得 $H^S(F)$ 从∞“跳跃”到 0。这个临界值称为 F 的豪斯道夫维数，记为

$$\dim_{\mathrm{H}}F=S \tag{8}$$

（七）我的理解

以上这一段数学表达还是比较难懂。我想用简单的语言加以描述。豪斯道夫测度 $H^S(F)$ 是一种广义的 n 维空间中度量一个集 F 的广义的“长度”(或广度的“体积”)。那么，现在假设研究一个 $n=2$ 的二维空间中一个长方形，如果用 $S=1$ 的一维空间的尺子去度量这个长方形的“长度”，一定感觉到这个长方形“长”得不行，即 $H^1(F)=\infty$。所以图 11 中当 S 小于 $\dim_{\mathrm{H}}F$ 时，测度为∞。再想一下，对这个长方形，如果用 $S=3$ 的三维空间的眼光去量这个长方形的“体积”时，一定感到它“薄”得不行，即其体积为 0，也就是 $H^3(F)=0$。所以只有当你用 $S=2$ 二维空间的眼光，用“面积”作为尺度，去量这个长方形，才能得到介于 0 到∞中间的一个实数，即为实际面积。此时，也正好证明了一个实心长方形的豪斯道夫维数是 2.0。

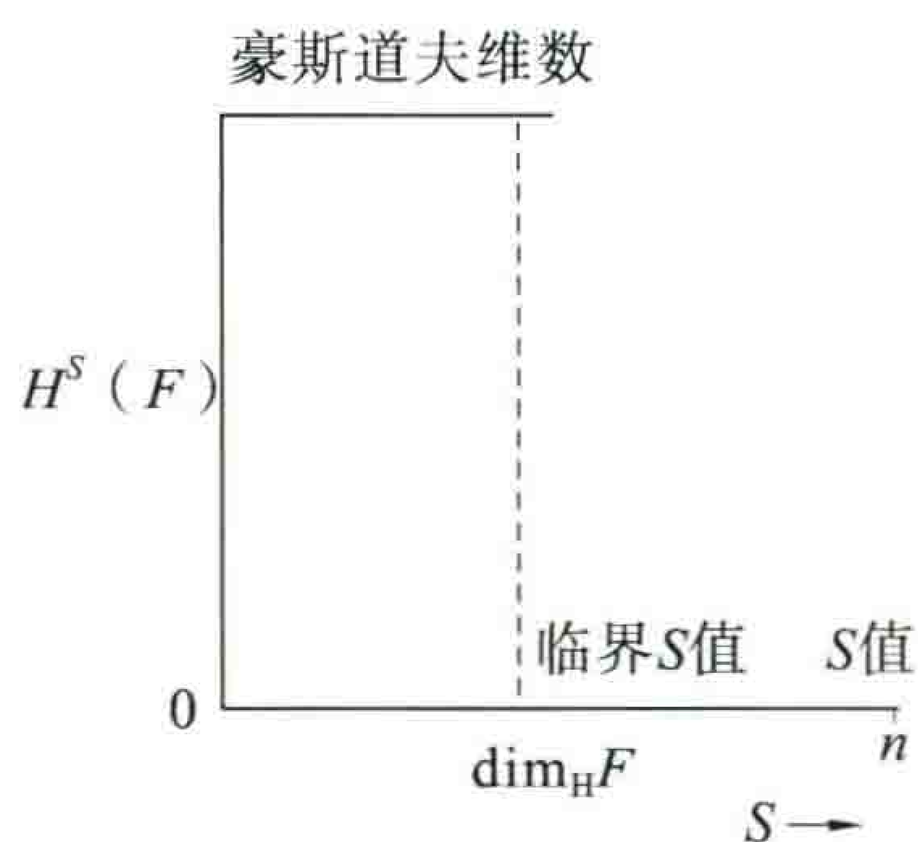


图 12 集 F 的 $H^S(F)$ 对 S 的图

豪斯道夫维数是使从∞“跳跃”到 0 发生的 S 的数值，$H^S(F)$ 为豪斯道夫测度

以上的各种分维数的定义都是人们想用数学语言来表述我们对一个复杂几何图形维数的理解。非整数维的东西在自然界中不是实际存在的。例如图 2 中像海岸线的图，实际上还是绘在二维的平面之中。只是因为这个图较经典的直线或圆弧变得复杂，所以称其为 1.2 维。正如前一时期有人把简易三维地震称为“2.5 维”的情形是相似的，所以“非整数维并不神奇”。

二、映射变换

用一些简单的数学表达式可以形成一种图形的变换称为映射变换。通过多次变换可以生成一种分形集，主要分为两类，即“自相似集”和“自仿射集”，下面分别说明。

（一）自相似集

自相似集可以通过迭代的相似压缩映射来实现。如图 13 中将一个大椭圆 E 分别映射到两个小椭圆 $S_1(E)$ 和 $S_2(E)$，并且可以继续不断地映射到更小的椭圆中去。显然，最后构成了分形结构。自相似集的分维数可以从图形各分段的压缩比之和中解出，即

$$\sum_{i=1}^{m} C_i^S = 1 \tag{9}$$

式中 C_i 为各分段的压缩比。如图 14 的树状分形，它的“生成元”是由 5 段长度缩小 1/3 的线段所组成。因此有 $5\times(1/3)^S=1$。故解得 $S=\log_{10}5/\log_{10}3=1.465$。又如图 15 的花边图形的生成元绘在最上端，它是横向三根 1/3 的线段与纵向两根 1/4 的竖线所组成。每次迭代，图形进一步变复杂，变到 E_4 就形成一个花边形状。它的维数可从式(9)出发，即 $3\times(1/3)^S+2\times(1/4)^S=1$ 中解得 $S=1.34$。

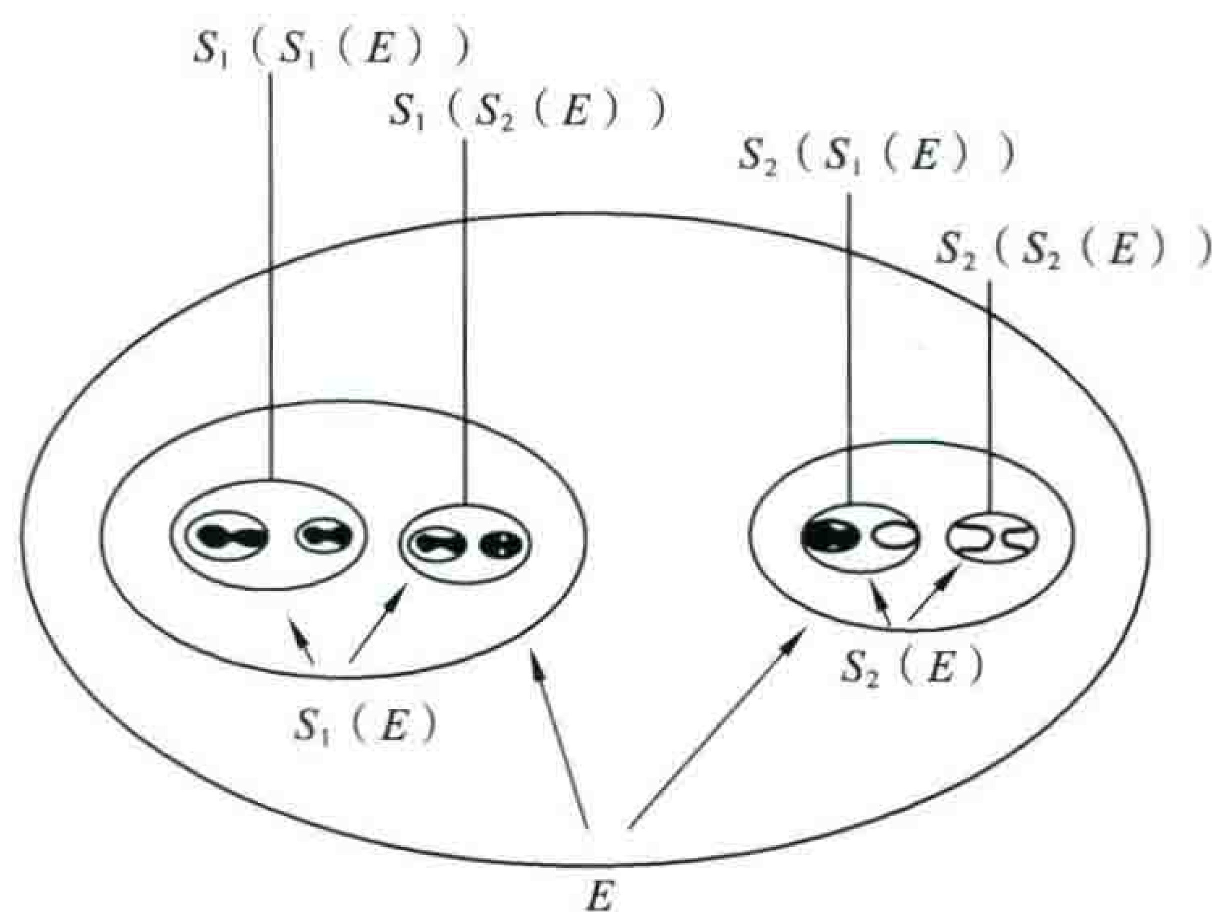


图 13 连续的分形压缩映射

S_1 与 S_2 的不变集的构造，它们把大椭圆 E 分别映射成椭圆 $S_1(E)$ 和 $S_2(E)$；集 $S^k(E)=U_{i_j=1,2}S_{i_1}\cdots S_{i_k}(E)$ 给出了集 F 的越来越好的逼近

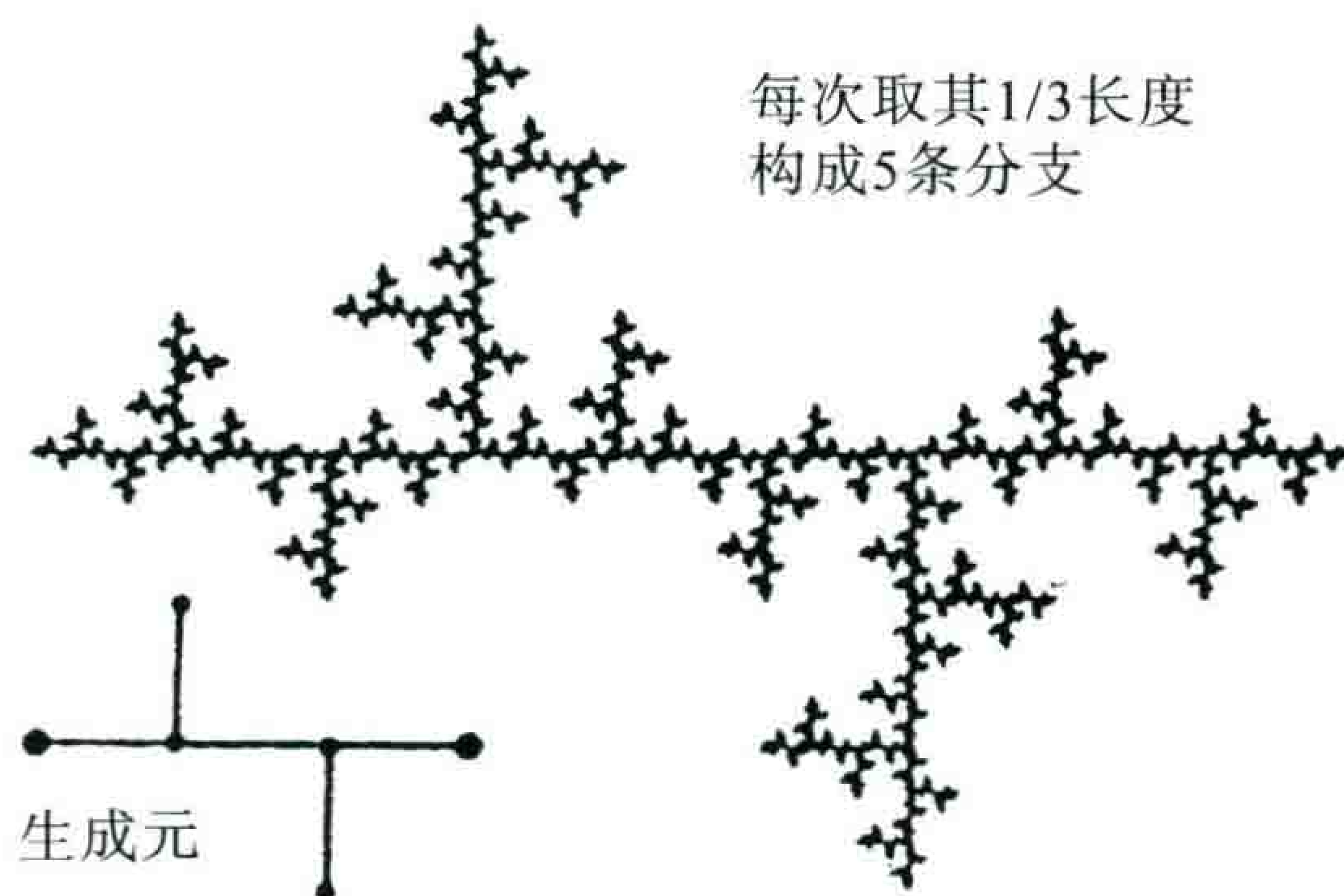


图 14 树状分形与它的生成元

其豪斯道夫和盒维数等于 $\log_{10}5/\log_{10}3=1.465$

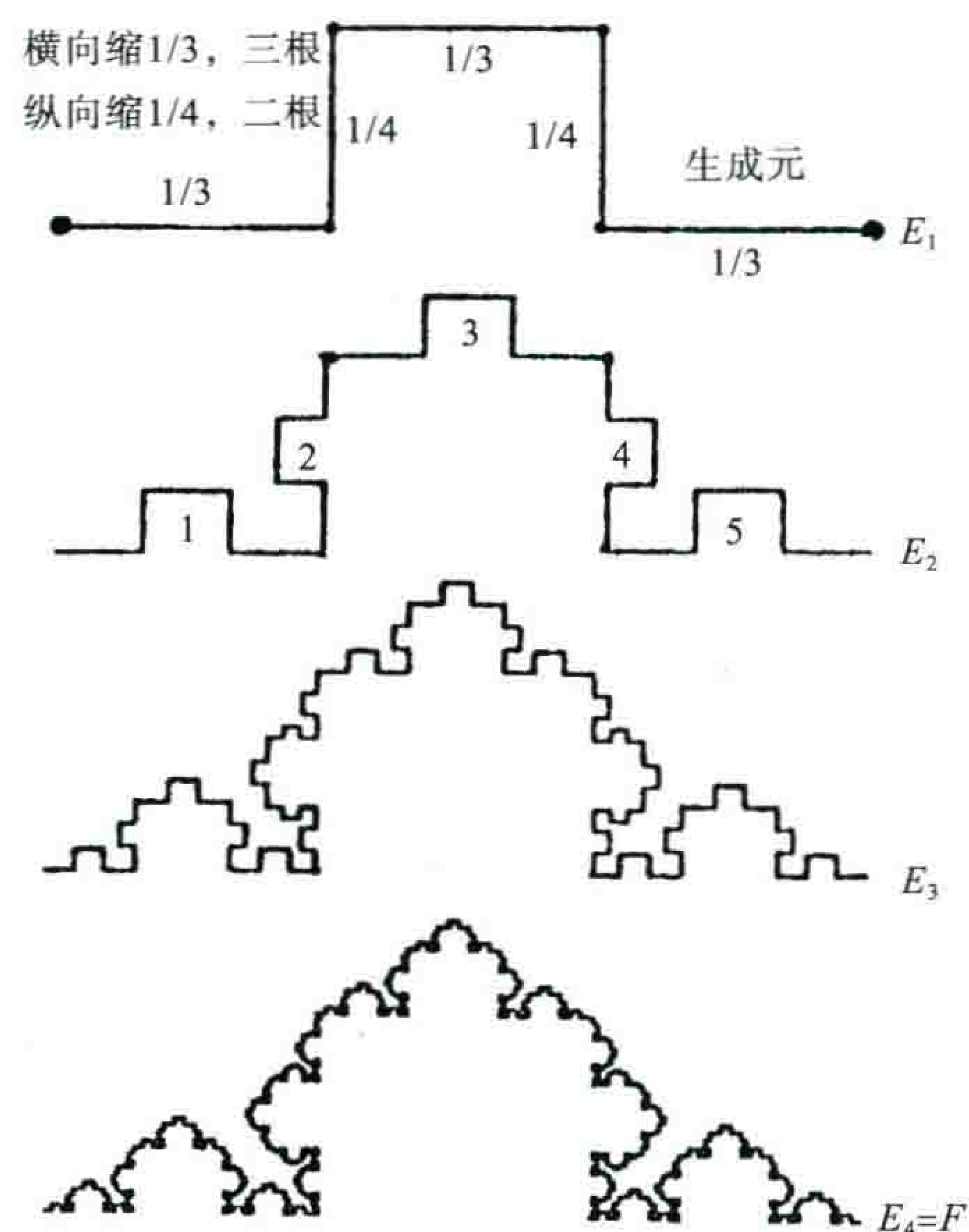


图 15 由一个生成元构造分形曲线的几个阶段

生成元线段的长度分别为 1/3、1/4、1/3、1/4、1/3；F 的豪斯道夫和盒维数由方程 $3(1/3)^S+2(1/4)^S=1$ 给出，或者 $S=1.34$

（二）自仿射集

自仿射集可以组成另一类重要的分形集。实际上自相似集只是自仿射集的某些特例。仿射映射 S：$R^n \to R^n$ 是具有下面形式的映射

$$S(X)=T(X)+B$$

其中：T 是 R^n 上的线性变换算子，为一个 $n \times n$ 阶矩阵，它具有图形旋转、胀缩变换的功能；B 是 R^n 中的一个位移向量。仿射变换可包括平移、旋转、胀缩以及可能还有反射的组合。它可以把球映射成椭球，把正方形映射成平行四边形，变化万千。与相似映射的区别之处是，仿射映射在不同的方向上可以具有不同的胀缩比。

图 16 是把一个正方形中的图形仿射成三个矩形图，这里既有压缩又有旋转及平移。图 3 中的羊齿叶及青草图案也是由仿射映射产生。

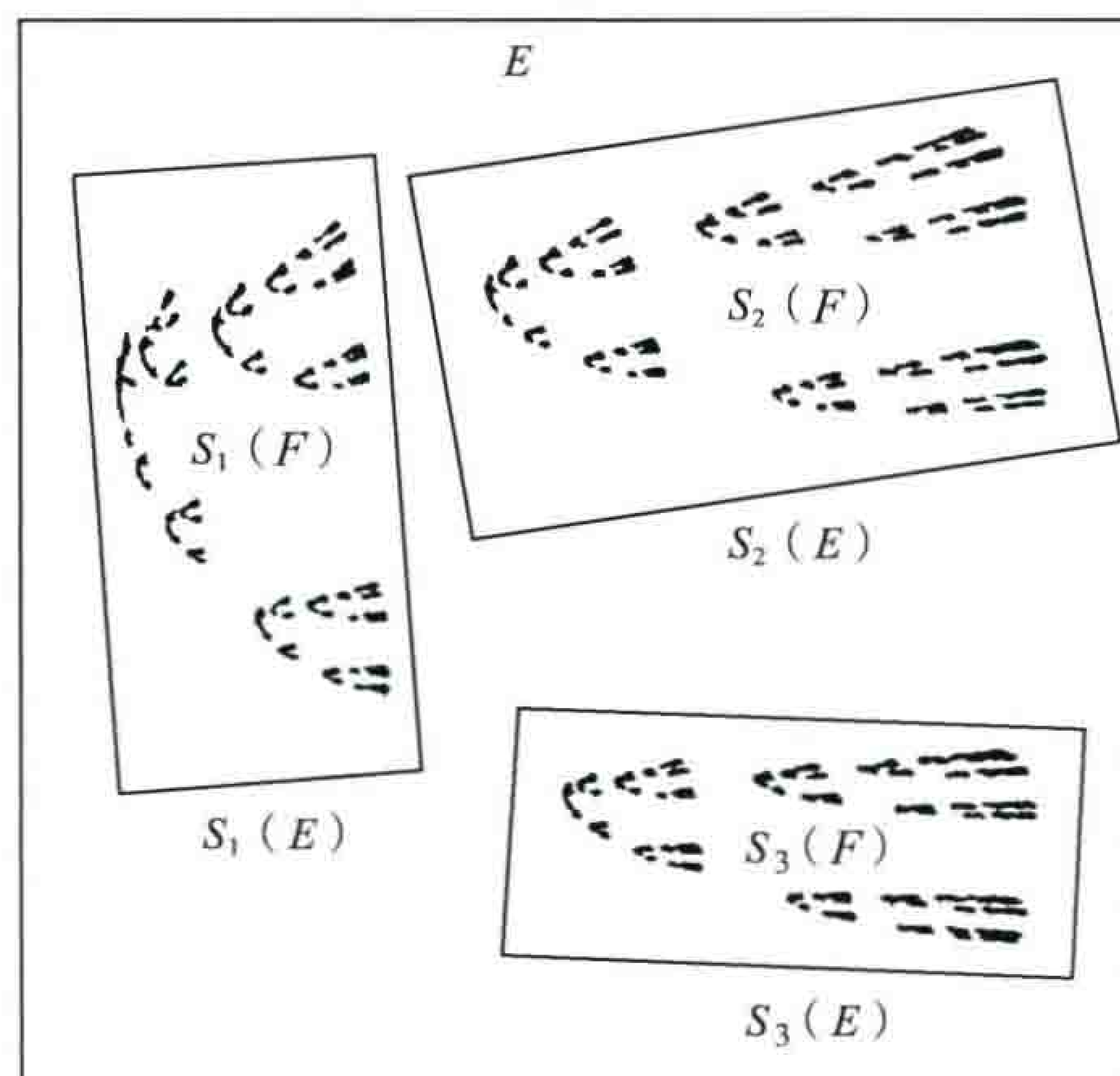


图 16 自仿射集

自仿射集变换 S_1、S_2 和 S_3 的不变的自仿射集，S_1、S_2 和 S_3 把正方形变换成所示的矩形

一个最普通的对于坐标点(x,y)的仿射变换可表示为

$$S_i\begin{bmatrix}x\\y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1/m & 0\\c_i & d_i\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\y\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}(i-1)/m\\bi\end{bmatrix}\qquad 1\leqslant i\leqslant m \tag{10}$$

式中，S_i 映射过程是一种图形的压缩，就是把垂直线仍旧映射成垂直线，并且把满足 $0\leqslant x\leqslant 1$ 条件的垂直窄条上的点，映射到满足 $(i-1)/m\leqslant x\leqslant \mathrm{i}/md$ 的窄条上。

（三）自仿射曲线——分形曲线

图 16 是式(10)中 $m=2$ 情况的例子(即横向压缩比为 0.5)。由此图可见，一个多次自仿射过程可以构造成一条复杂的自仿射曲线。图 17(a)中的第一个仿射变换 S_1 先将已知的大三角形 $p_0p_1p_2$ 向上方仿射变换成两个小三角形：即 $p_0q_1p_1$ 及 $p_1q_2p_2$。其横向压缩比为 0.5，纵向压缩比为 0.7。然后，依次再将每个小三角形再映射成左右两个更小的三角形如 S_2，S_3，…，依次类推。最后，三角形愈来愈小，而其外边界就逼近于一条连续的分形的自仿射曲线，即分形曲线。

这条自仿射曲线的形态是由初始大三角形的形态及变换中的纵向压缩比所决定的。因为初始大三角形是中间向上凸出的，所以其分形曲线的每个细节都向上凸出。

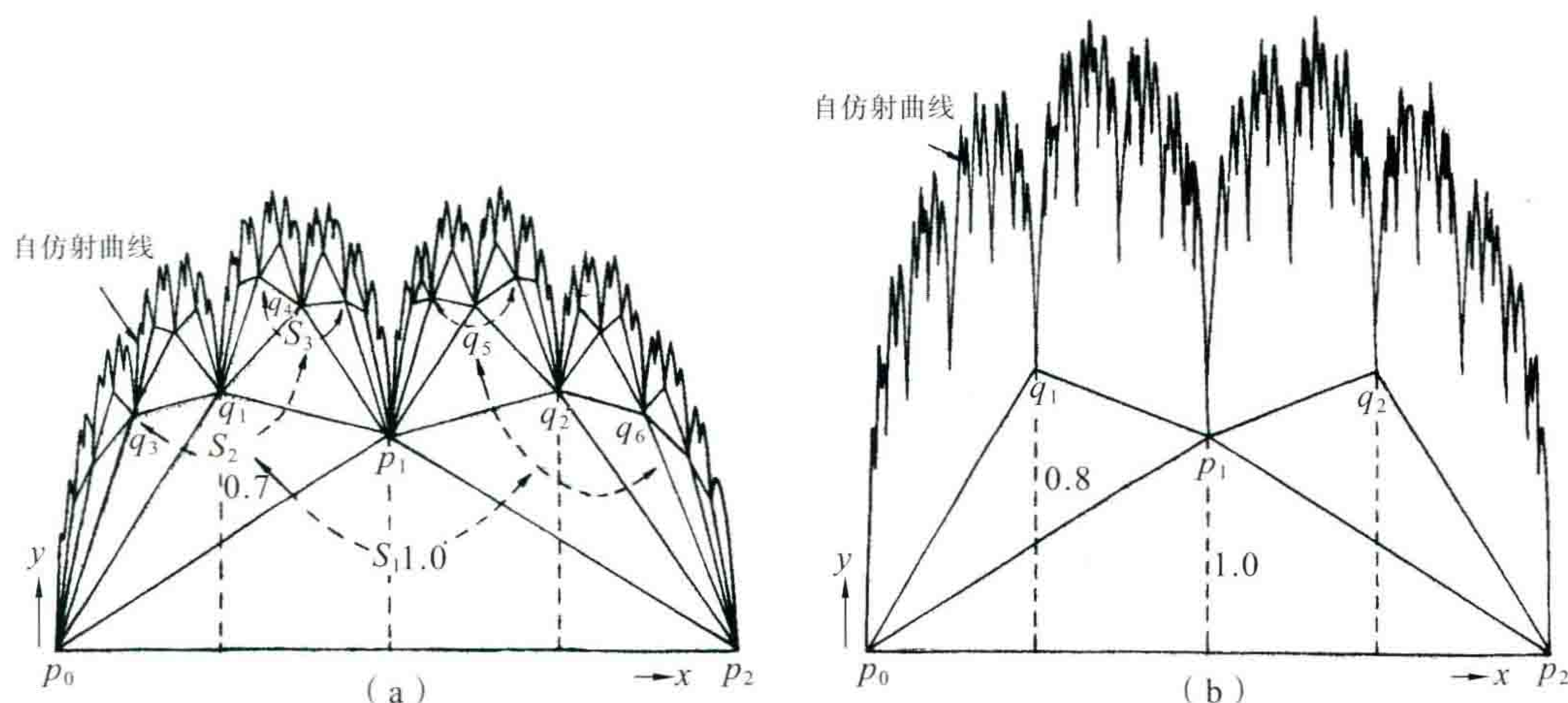


图 17 由自仿射构成的分形曲线

把三角形 $p_0p_1p_2$ 映射成 $p_0q_1p_1$ 和 $p_0q_2p_2$ 的两个仿射变换定义的自仿射曲线

(a) 为两个变换的垂直压缩比都为 0.7 时，dimB graph $f=1.49$；(b) 垂直压缩比都为 0.8 时，$\dim_B$ graph $f=1.68$

图 17 给出了同一个大三角形分别用垂直压缩比为 0.7 及 0.8 的两种自仿射曲线的形状，它们的盒分维数分别为 1.49 及 1.68。从中可以看出，同样从这个大三角形出发，若采用不同的分维数，是会内插出形状相差很大的曲线。

自仿射曲线的分维数为：

$$\dim_B F=1+\log_{10}(d_1+d_2+\cdots+d_n)/\log_{10}m \tag{11}$$

式中 d_i 表示纵向压缩比。

（四）分形内插

在上面这个例子中，p_0、p_1、p_2 三个不动点是内插的控制点，这种仿射时的不动点又称“吸引子”。于是分形内插的过程可以理解为：当已知三个固定点 p_0、p_1、p_2 时，如果采用通常的“线性内插”，就是直接使用大三角形的两个斜边作为内插结果。而分形内插是使用复杂的多角形外包线(即自仿射曲线)来获得内插区间的任何一个值。显然这种内插是否合理完全取决于自然界是否按照自仿射的规律行事。此外，还取决于你所选择的分维数。取 1.49 或 1.68，结果会大不一样。

上面自仿射图形是 $m=2$ 的例子，它只有三个不动点。在更普遍的意义下是 m 数量较大的情况，图 17 是 $m=4$，有 $m+1=5$ 个不动点(即吸引子)p_0 至 p_4，分四段内插的情形。显然通过这 5 个点的内插曲线会

有无穷多个，而我们需要的是具有分形结构的分形内插曲线。如果原来 5 个点具有大致像 M 的形状，即 p_0、p_1、p_2、p_3、p_4 的连线。那么，认为其精细结构也是小的“M”形，于是每次用“M”形代替一个直线段，如图 18 所示，可得到分形曲线的逼近形态。

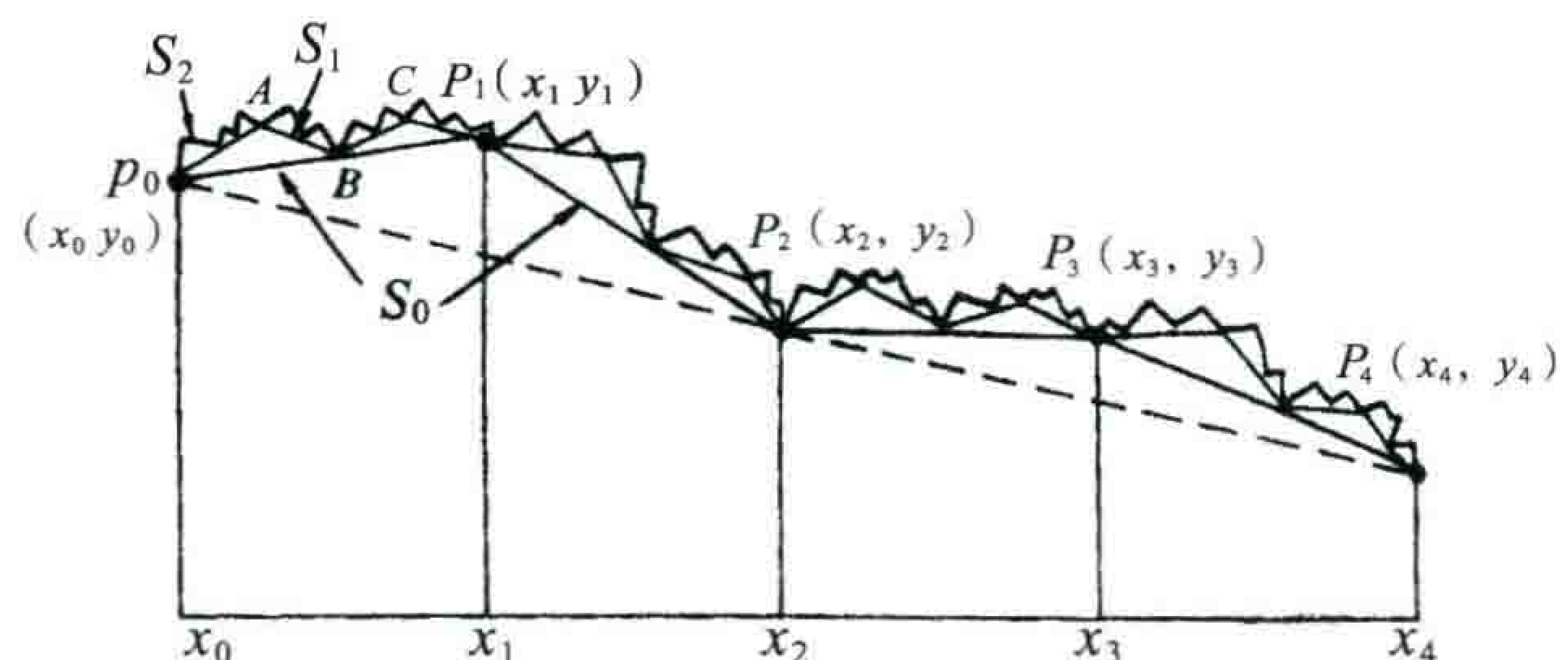


图 18 有五个不动点情况下的分形内插

这条分形曲线，由二维空间 R2 里许多次压缩映射所组成。每一个映射可写成一般的仿射变换形式，如

$$W_i\begin{bmatrix}x\\y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}a_i & 0\\c_i & d_i\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x\\y\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}e_i\\f_i\end{bmatrix} \tag{12}$$

式中：W_i 是第 i 次仿射变换，$i=1,2,3,\cdots,n$；a_i 是仿射变换时横距离 x 的压缩比系数，常取 $a_i=1/m$；d_i 是变换中纵坐标的压缩比；c_i 是坐标旋转角的正切；e_i 及 f_i 分别是平移和竖移的距离。这是一个完整的线性仿射变换。

注意，上面公式中，这 i 次仿射的 a_i、c_i、d_i、e_i 及 f_i 可以是，而且常常是各不相同的，它们是互相独立的参变量。

现在我们的约束条件是，在内插过程中，不论如何变换，这 5 个点是不能动的。如图 17 所示，在第一内插段中，首点永远是 p_0 本身，而尾点是由 p_4 映射到 p_1 点，即

$$W_i(p_0)=p_0$$

$$W_i(p_4)=p_1$$

仿此应有

$$\begin{cases}\text{首点为}\quad W_i\begin{bmatrix}x_0\\y_0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_{i-1}\\y_{i-1}\end{bmatrix}\\ \text{尾点为}\quad W_i\begin{bmatrix}x_4\\y_4\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}x_4\\y_4\end{bmatrix}\end{cases}\quad i=1,2,3,4 \tag{13}$$

式(13)共有四对 8 个方程式，这便是约束条件。

第一内插段中，在作更小一个“M”形状的仿射变换时，约束条件又变成要求 S_2 的 p_0、A、B、C、p_1 等 5 个点不动，再继续作小“M”形变换。

（五）内插实例

图 19 便是对英格兰岛西南角的海岸线作分形内插的实际例子。它以西南角为基准点，把北部和南部两条曲线分别作内插。其中图 19(a)为原图，(b)(c)(d)相应地为分维数取 1.1、1.2 及 1.3 的内插结果。此例中分维数为 1.3 的十分不自然，我想也就是过分地夸张了其自相似结构的缘故。同时，因为南海岸线大轮廓是向上拱两下，所以图 19(d)的内插结果在细节上到处向上拱两下。相反，北岸线原图上有一个东陡西缓的向上拱起，内插后北岸在细节上也到处像小锯齿。

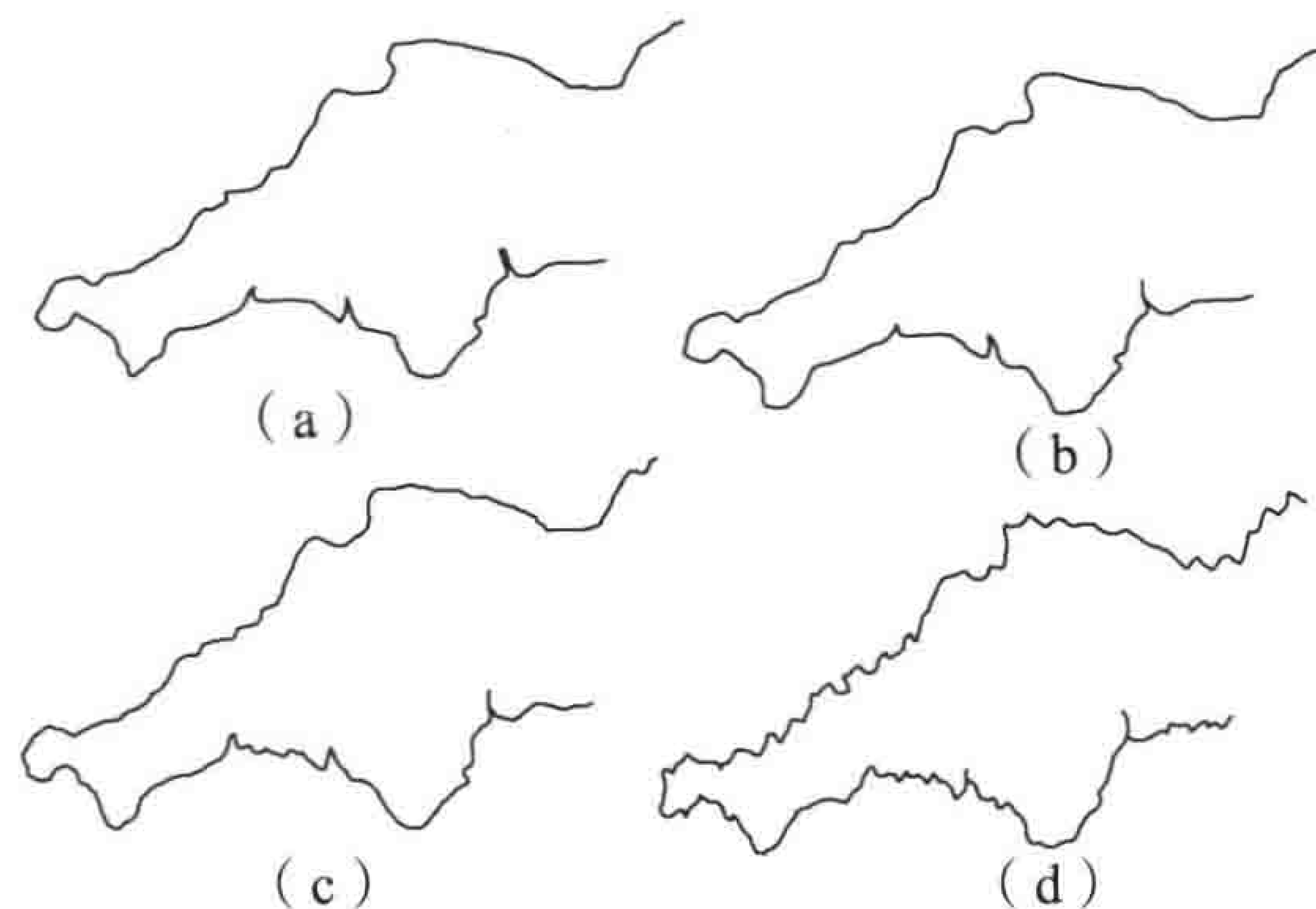


图 19　对英格兰西南部地图的北部和南部进行分形插值

(a) 为待内插的原图，其西南角顶点作为内插的基准点；

(b) 维数为 1.1；(c) 维数为 1.2；(d) 维数为 1.3



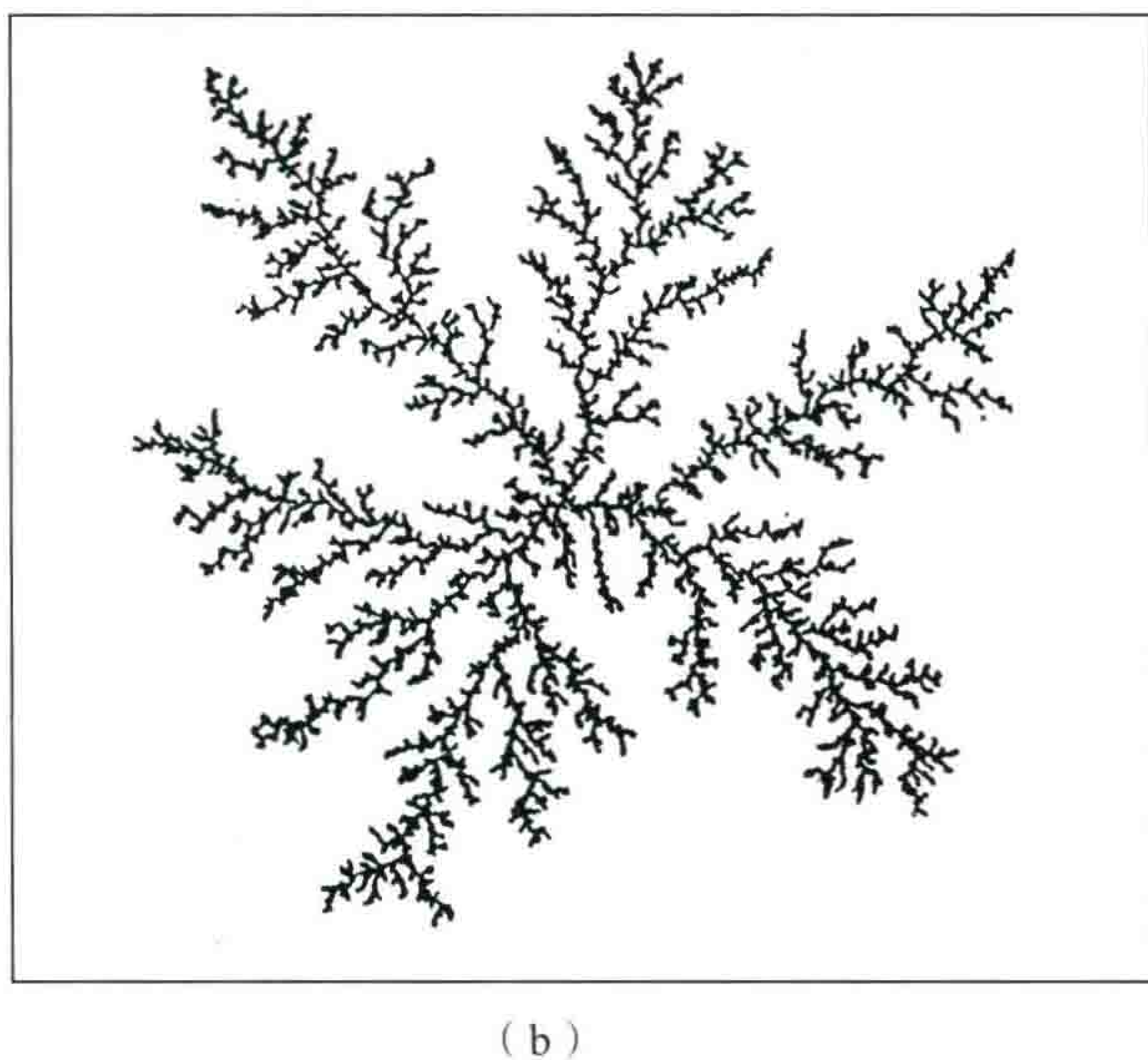


图 20　R^2 中布朗轨道的模拟(a)和用随机分形产生的铜离子电解析出的图形(b)

如今，分形插值法已经被认为可以“成功地”用来绘制地形图了。的确，作为分形几何学来说，能够把图 19(a)表达成图 19(c)已经是了不起的成就了。但是我们应该清醒地认识到，分形插值的结果仅仅是一种“表达形式”，它并不是实际存在的东西，而且当使用不同的起始段(即“生成元”)或不同的分维数时会得出不同的结果。因此，即使自然界中有分形现象，分形内插的结果也会是“多解的”。

有人认为：采用分形内插可以搞清“微观现象”，可从少量的钻孔资料推知储集层的分布情形，以及用分辨率很低的地震曲线内插出分辨率很高的波阻抗曲线。其实，这是对分形技术的一种误解。

三、分形技术在物理领域中的应用

这里列举教科书上几个比较生动的例子来说明分形技术在物理学中的应用。第一个例子是流体中分子“布朗运动”的模拟。布朗运动可用于研究气体分子运动的轨迹，它是流体中微小颗粒受分子碰撞形成的一条无规则的运动轨迹。在三维空间中，布朗运动具有稍稍大于2的豪斯道夫维数。图20(a)是用随机分维生成的二维空间中的布朗轨道的一个实例。当然，这条曲线是不固定的，因为它是随机生成的。

第二个实例是硫酸铜电解时，阴极上向外生长的铜的沉积具有“似分形样”的结构。图20(b)也是用随机分形产生的图形，计算中也应用了铜离子的布朗运动概念。

第三个例子是分形渗流。

图21表示生成渗流图形的办法。E_0表示液体浸入一个平面黑色方块，渗入后变为白色区。据此作分形，E_1、E_2……就像我们往油层中注水后水淹范围的某种分布的样子。这有可能用来研究注水的效果，但它不是真实的情况。拿它来作模型用以论证某些渗流过程倒是十分方便的工具。其具体实现过程是把图21(a)中E_0的正方形面积划分为$1/3\times1/3$的9个小正方形，随后定义一个概率$p(0<p<1)$，用此概率计算的那一个正方形将被选中而保留下来，否则被去掉，变成白色区块。E_1中表示了9块中已去掉两块。依此类推，E_2中再把每一个黑色小方块分成9块，再对每个小方块独立地求取选中的概率。最后经过很多次后，形成图21(b)和(c)的E_N图形(面积已放大四倍)。它是一个分形集，其分维数为

$$\dim_H F_p = \log_{10} 9p/\log_{10} 3$$

从这个分形渗流的最后结果可以看出：图21(b)及(c)中，p等于0.6及0.8的结果差别很大，并且与地层中实际渗流现象不太相似。所以说，分形的结果是倾向于“解释性”的，而非“预言性”的。

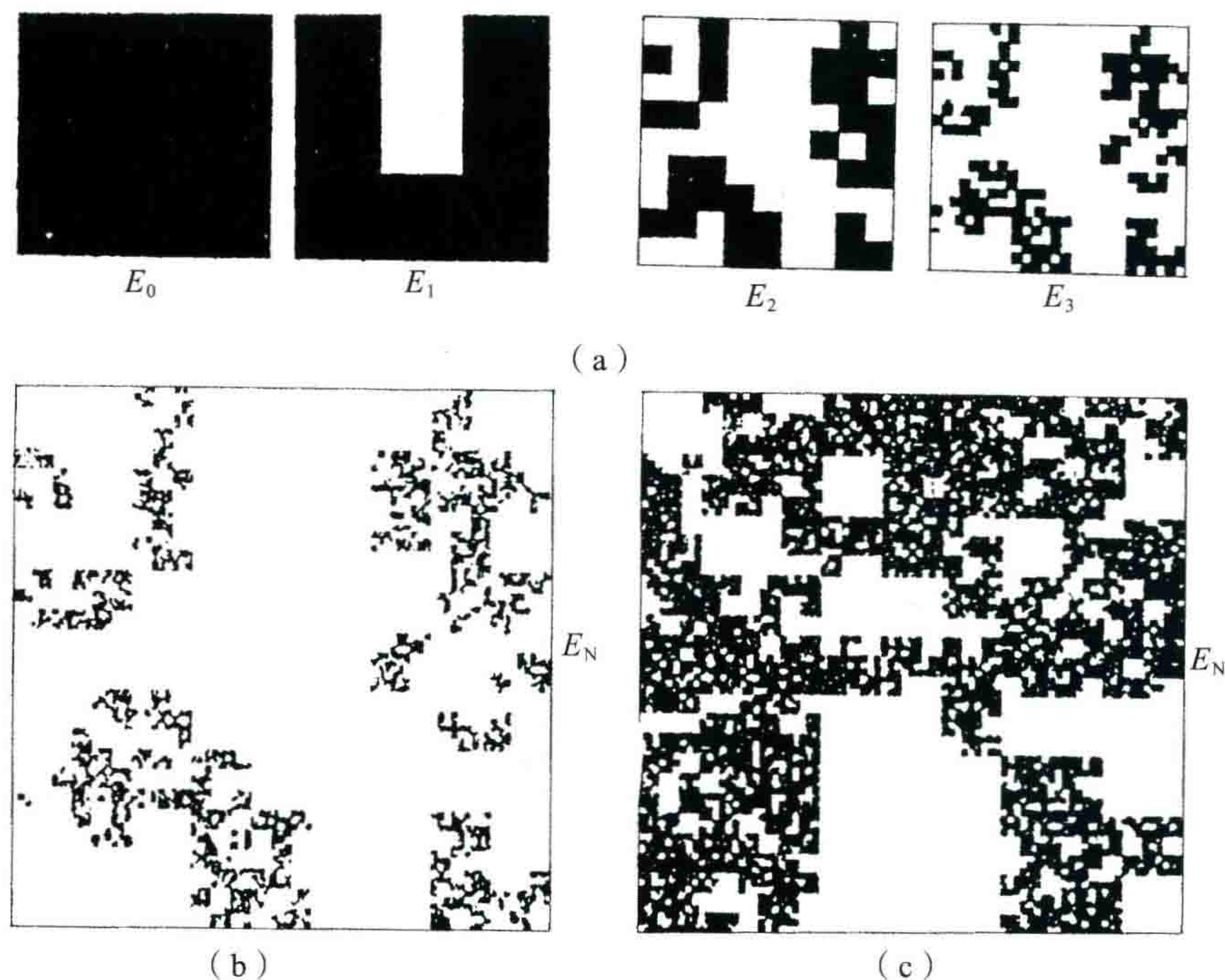


图21　生成渗流图形的原理(a)、随机分形在$p=0.6$时(b)和$p=0.8$时(c)的构造步骤所得的分形图E_N(面积放大4倍)

四、地震道的分维数能够说明什么？

当前有不少人利用地震叠加剖面上的各地震道计算分维数，然后根据分维数的异常来判断地下的含油性及预测裂缝发育带。我认为这种做法存在很多的疑问。

求地震道的分维数有多种方法，通常有关联维法和频谱分析法两种。

（一）关联维方法

用“关联维”的方法是根据相空间的特性来求分维数的。关联维的求取需对时间域曲线 $x_i=x(t_i)$ 重新排列，建立一个时间移动间隔 τ 的、k 维的向量相空间 $\{x_i\}k$。如原始时间序列为 $x_1,x_2,x_3,\cdots,x_n$，则扩展的相空间有如下向量

$$\begin{cases} X_1=[x(t_1),x(t_1+x),x(t_1+2\tau),\cdots,x(t_1+(k-1)\tau)] \\ X_2=[x(t_2),x(t_2+\tau),x(t_2+2\tau),\cdots x(t_2+(k-1)\tau)] \\ \vdots \\ X_i=[x(t_i),x(t_i+\tau),x(t_i+2\tau),\cdots x(t_i+(k-1)\tau)] \end{cases} \quad i=1,2,3,\cdots n \tag{14}$$

然后在相空间中，任给一个直径 δ，检查有多少对 (x_i,x_j) 之间的距离小于 δ，并把距离小于 δ 的点相对于所有可能的总对子数的比例记为

$$C(\delta)=\frac{1}{N^2}\sum_{\substack{i=1\\j=1\\i\neq j}}^{N}\Phi(\delta-\parallel|X_i-X_j\parallel) \tag{15}$$

其中 $\Phi(\theta)$ 为 Heaviside 函数，即阶跃函数

$$\Phi(\theta)=\begin{cases}0 & \text{当 } \theta<0 \text{ 时} \\ 1 & \text{当 } \theta\geqslant 0 \text{ 时}\end{cases}$$

显然，$C_2(\delta)$ 随着 δ 的增大而增加。试验不同的 δ，设法找到一个合适的区间，使 $C_2(\delta)$ 随 δ 的变化呈幂函数形式，即

$$C_2(\delta)\propto\delta^D$$

或写成

$$D=\log_{10}C_2(\delta)/\log_{10}\delta \tag{16}$$

这也可以通过绘制一张 $\log_{10}C_2(\delta)$-$\log_{10}\delta$ 的图，然后用直线拟合，其斜率便是关联维 D。[3] 在文献 4 中，该文作者将 τ 定义为一个 Δt，即形成左移一个点的相空间数据，以便节省计算工作量。这种在相空间中计算关联维的方法实质上也是一种变相的计盒维数法。例如我们可以理解长方形盒的边长为 $\delta\times(\tau\times k)$。

（二）频谱分析法

利用频谱分析方法求分维数，文献 4 中把它称为“容量维”，这是目前大家最常用的分维数。该分维数可简单表达成

$$\dim_F F=-\frac{\ln A(f)}{\ln f} \tag{17}$$

也就是用地震道的振幅谱 $A(f)$ 绘成双对数坐标，纵坐标为 $\ln A(f)$，横坐标为 $\ln f$，然后拟合求一直线。此直线的斜率，称为该地震道的分维数（取其负号）。

由于大地对地震波的高频成分吸收比低频快，所以地震波的振幅在高频端总是迅速下降。因此，其斜率一般都是负的（分维数便是正的）。正因为这样，不少人就认为这个斜率（分维数）的大小是反映地层对地震波吸收的强与弱。而当地下存在含油气地层时，吸收变强、斜率会变陡。同样的，当地层中裂缝发育时，吸收也会加强。因此，似乎采用分维数来预测含油性及寻找裂缝发育带也就有了理论依据。实际上，

上述结论有两个问题欠考虑。

(1) 地震道之中高频端往往都是以噪声为主的，所以拟合出来的斜率值(分维数)主要由高频噪声所控制。我这几年主要从事地震高分辨率的研究，发现常规地震剖面在频率域中(1.0 s以下的地层里)，当频率为70 Hz以上时几乎完全是一片随机噪声。这些高频随机噪声是野外数据采集时排列上的风吹草动所引起，它是我们提高分辨率的主要障碍。

(2) 地层中的含油气部分通常很薄，一般油气层厚度只有10～30 m。裂缝带的厚度也不会很厚，它对高频的吸收作用只能主要反映在地震道的个别反射相位上(一个相位不到)。当前，含油气造成的个别相位的振幅、频率变化已很难识别，就更难影响双对数坐标中拟合线的斜率值(分维数)。

由于以上两个因素，实际地震道的分维数计算结果基本上不是反映油气(或者裂缝带)，而是反映高频噪声的状况。现在我先用模型论证来说明这些问题。

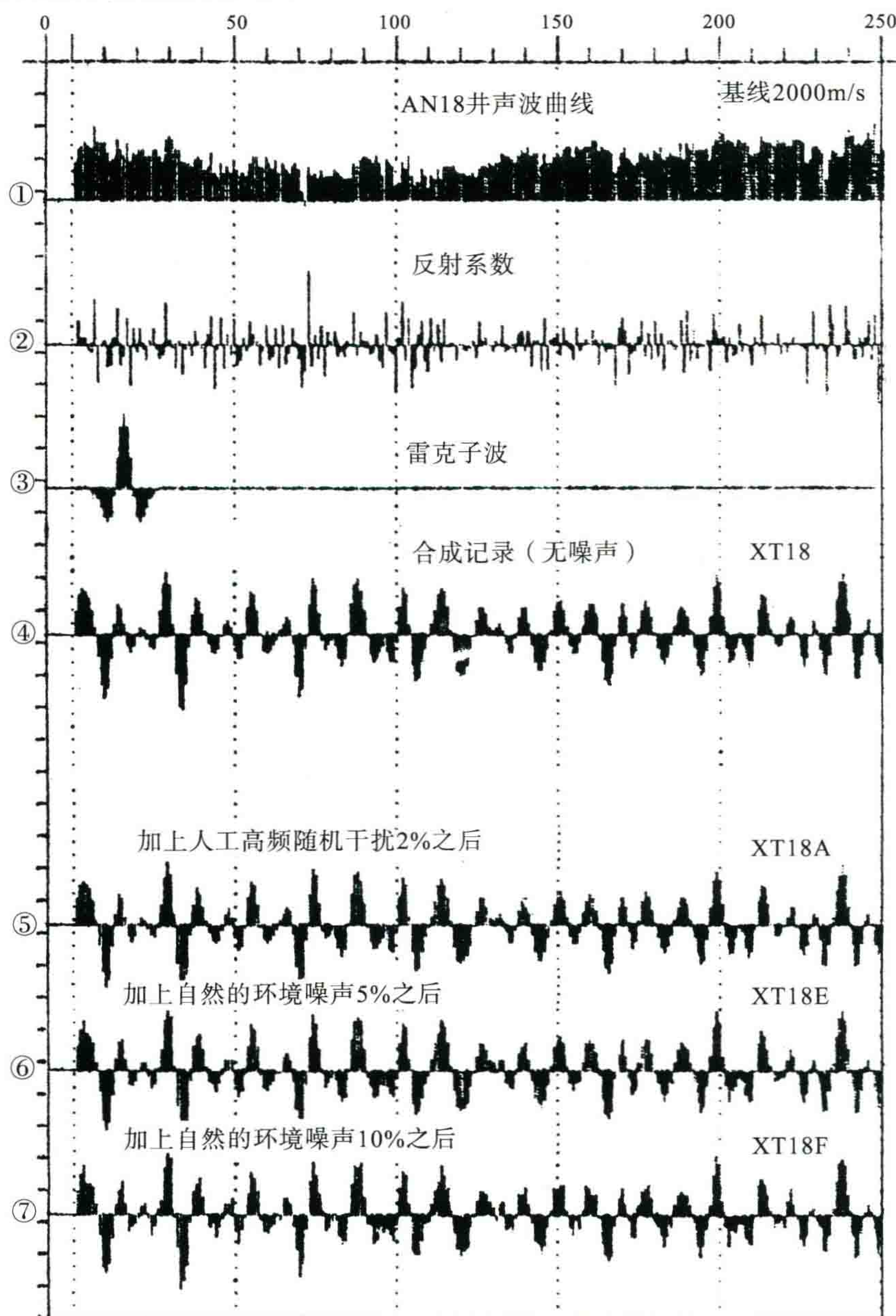


图22 由分维数计算的模型(采样率2 ms)

① AN18井的声波曲线；② 反射系数；③ 雷克子波；④ 合成记录；⑤、⑥、⑦分别为加上人工高频随机干扰2%后和加上环境噪声5%及10%之后的合成记录

1. AN18 井的分维数计算

图 22 是依据 AN18 井资料设计的一套用于计算分维数的基础数据。曲线①是该井中第三系地层的声波测井曲线，采样率为 2 ms。此曲线换算成速度后一般为 3000～4000 m/s；曲线②为反射系数曲线（假定密度遵循 Gardner 公式）；曲线③表示一个雷克子波（主频 40 Hz）；将此子波与反射系数褶积，得合成地震记录道，如曲线④所示。

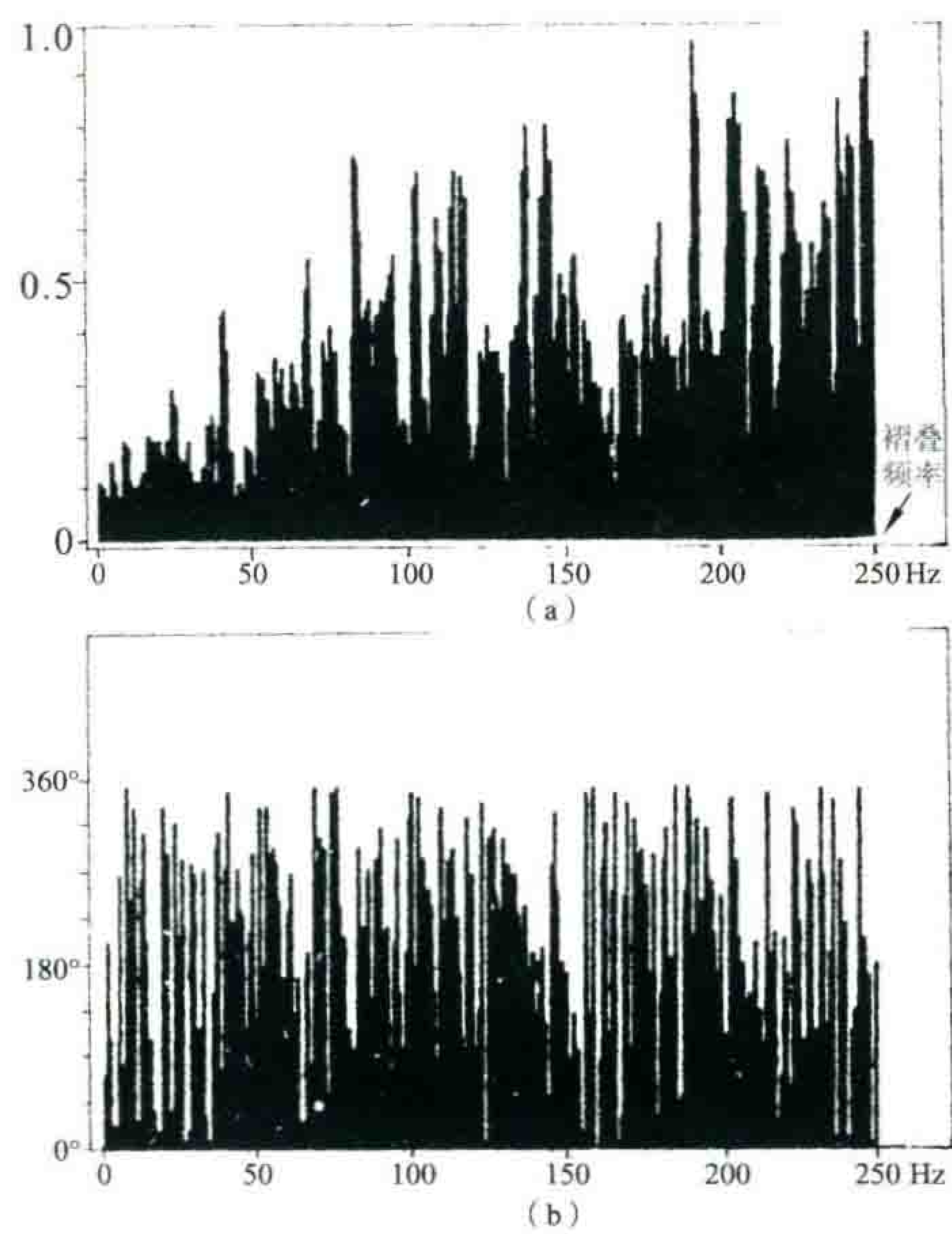


图 23　AN18 井的反射系数频谱

(a) 振幅谱；(b) 相位谱

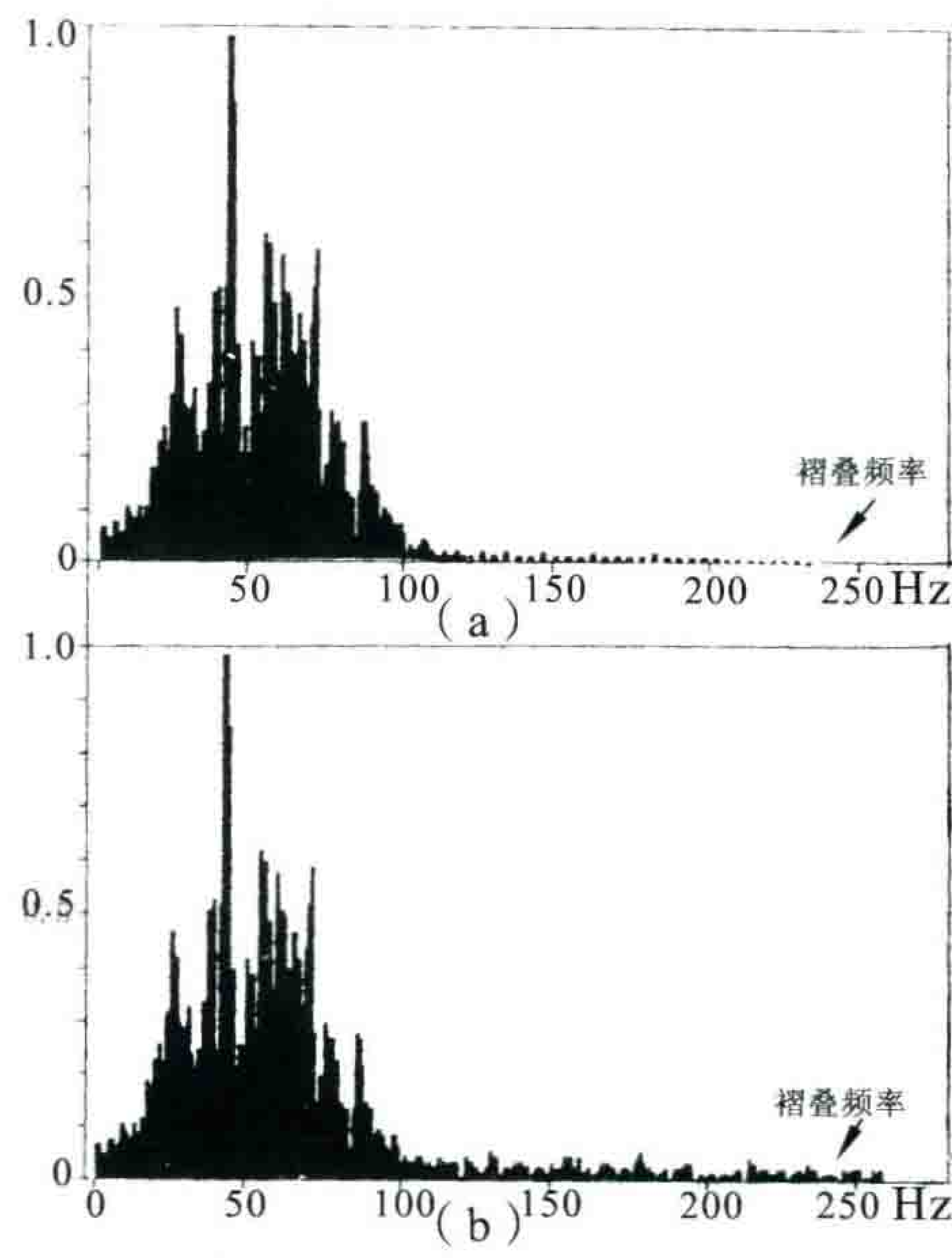


图 24　合成地震道振幅谱

(a) 未加噪声；(b) 加上 5%环境噪声之后的频谱

图 23 是反射系数的频谱，它有丰富的高频，而低频较缺乏。我试图对其求分维数，结果得到负的分维数，这显然是不合理的。图 24 是合成地震道的振幅谱，它的高频明显地衰减了，峰值为43 Hz（在正常坐标情况下）。为了求其分维数，我们在双对数坐标系绘此频谱，如图 25 所示。图 25(a)是采用散点绘制的频谱数据，共 256 个散点。用最小二乘法拟合求得其截距 $\tau=5.233$，斜率 $Q=-1.282$，因此分维数为 +1.282。图 25(b)是用另一种方式表示，即把散点绘成纵向的直线，由此图可以更加清楚地看到，在对数坐标的情况下，低频端样点很稀，而高频端很密。因此，在用最小二乘法求斜率时，高频端将起主要的作用。总的说来，地震道的频谱都具有这样的特点：从峰值频率向右，振幅很快地衰减。但地震道的分维数的散点很乱，基本上没有直线段可寻。

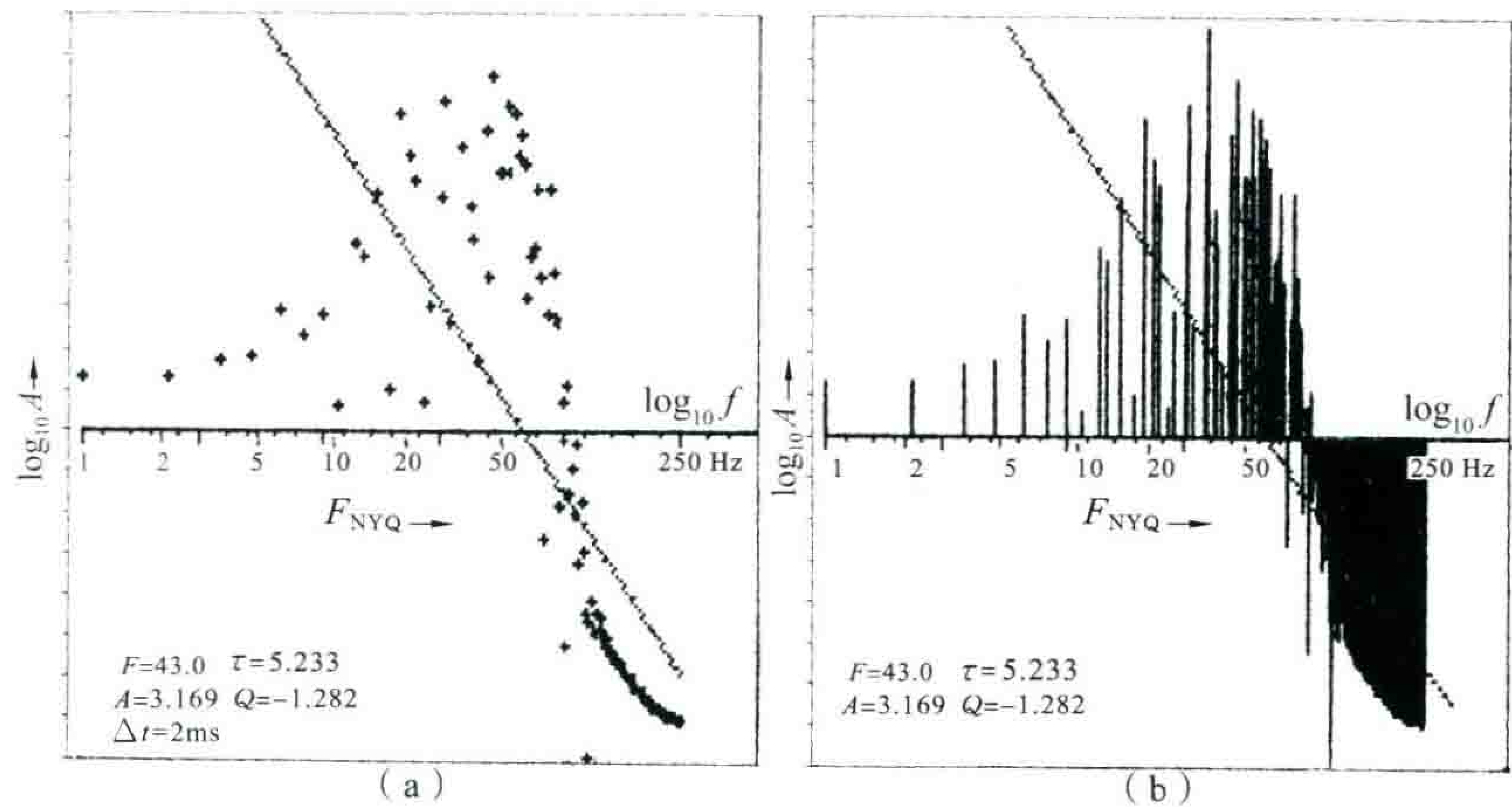


图 25　合成地震记录道的频谱情况

(a) 采用双对数坐标绘制的合成地震记录道频谱；(b) 用另一种表示方法，用直线棍代替散点

我尝试将图 25(a)中的散点，取其中间比较适合用直线拟合的一段来求斜率，得分维数为 3.764，如图

26 所示。这显然也是不合理的,因为在二维空间中的任何图形的分维数绝不能大于 2.0。

现在我们来看看当地震道中含有少量的高频噪声以后,其分维数将如何改变。图 21 下方⑤、⑥、⑦三条曲线是由无噪声合成地震记录道 XT18(曲线④)再加上噪声的结果。其中曲线⑤XT18A 是加上了由计算机产生的一个噪声模型,它包含主频为 85 Hz 及 125 Hz 两种雷克子波所产生的随机噪声模型。以时间域振幅平均值与信号道相比为 2%的强度相加,所以曲线⑤与④用肉眼是看不到差别的,但是它们对应双对数坐标的频谱就有了较大的差别(图 27),斜率值变为−1.251,分维数变小为 1.251。曲线⑥XT18E 是用有代表性的野外实际生产记录的初至波到达前的环境噪声,取其 20 道,求平均波形之后作为高频(也含有些低频)干扰的模型,再以时间域振幅平均值的 5%,加到信号道上而形成的。曲线⑥与信号道曲线④相比,也看不出有什么差别。但是用它求分维数(图 27),斜率变成了−0.896,变小了许多。再把野外放炮前录制的自然产生的环境噪声模型以 10%的强度加在信号道上,变成图 21 曲线⑦,即 XT18F。此曲线与曲线④对比,肉眼可见到少许不同。再用曲线⑦求分维数,得到的斜率又变为−0.625(图 28)。

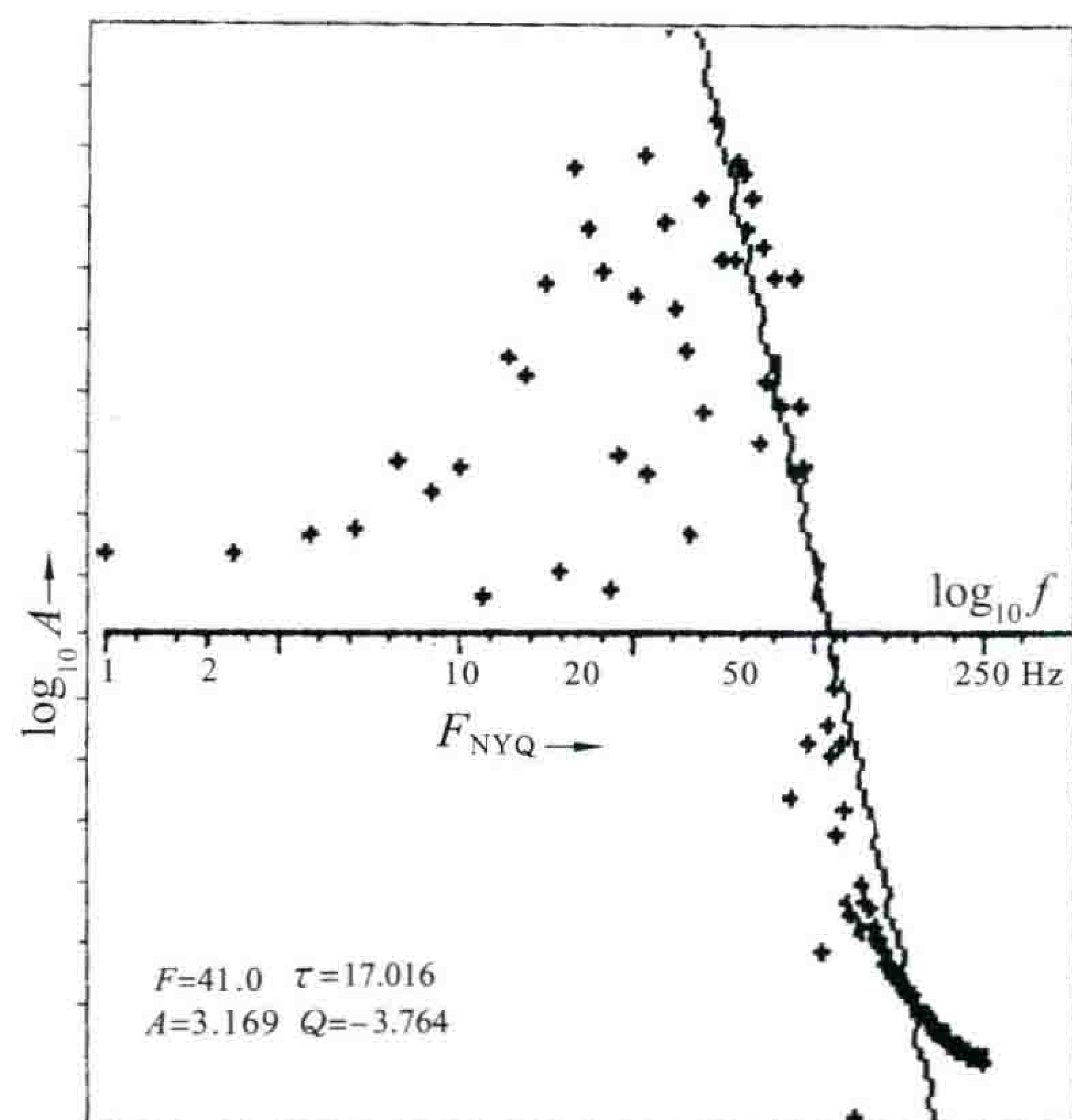


图 26 无噪声合成地震记录的双对数频谱
拟合时只照顾自峰值频率至 2/3 折叠频率

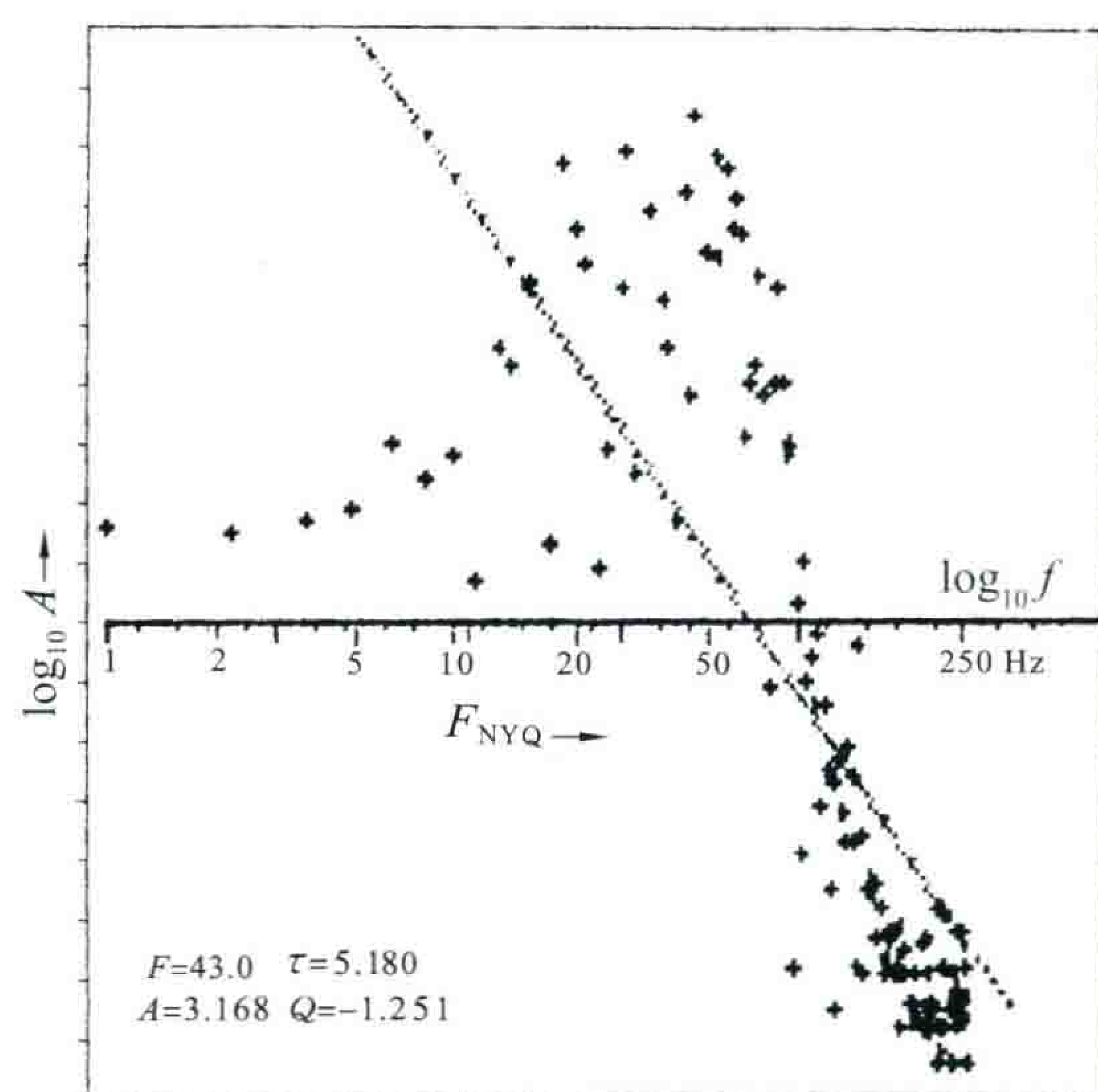


图 27 加上 2%的人工高频随机干扰后的频谱

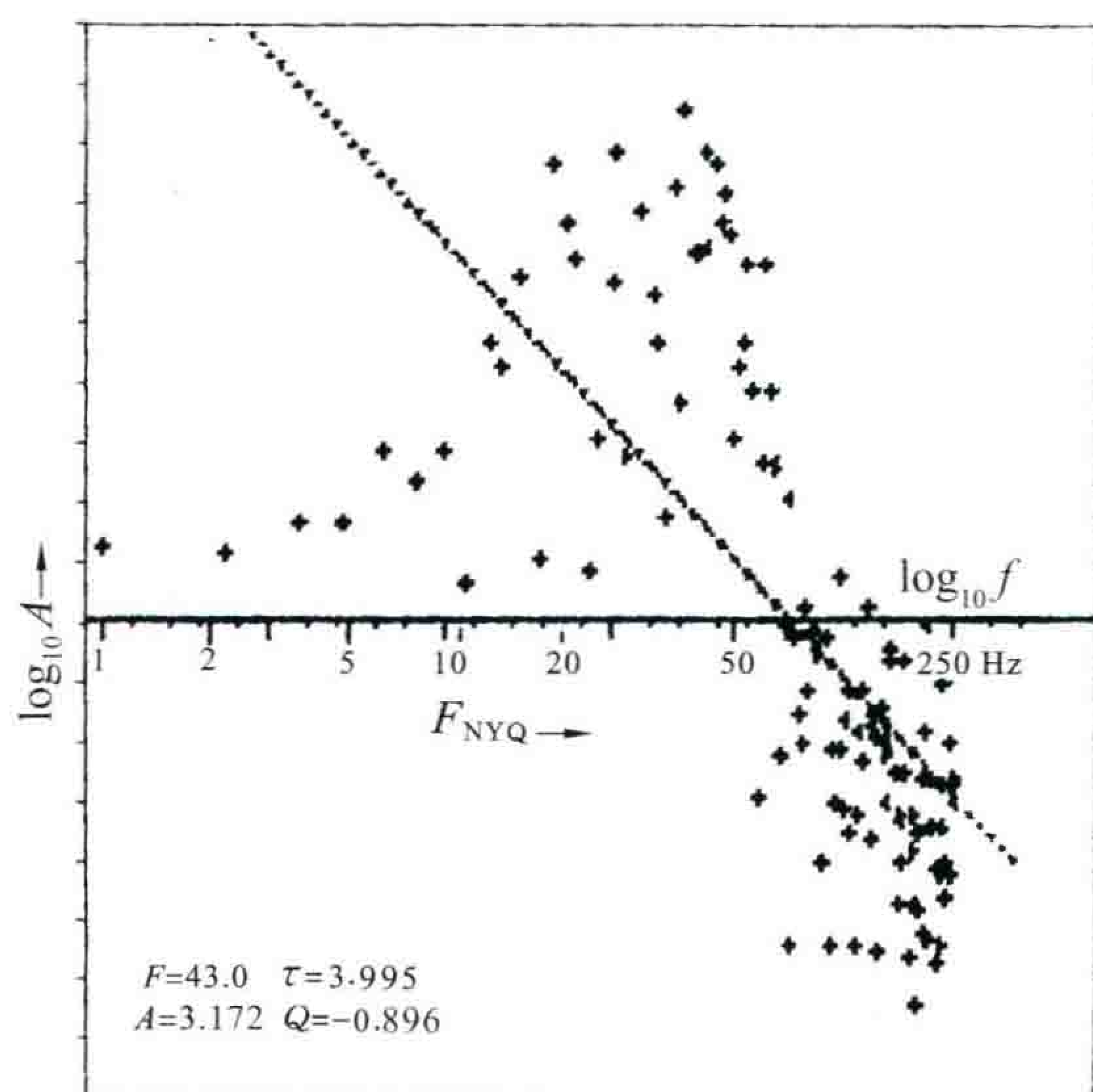


图 28 加上 5%自然环境噪声的频谱情况
参见图 21 中曲线⑥

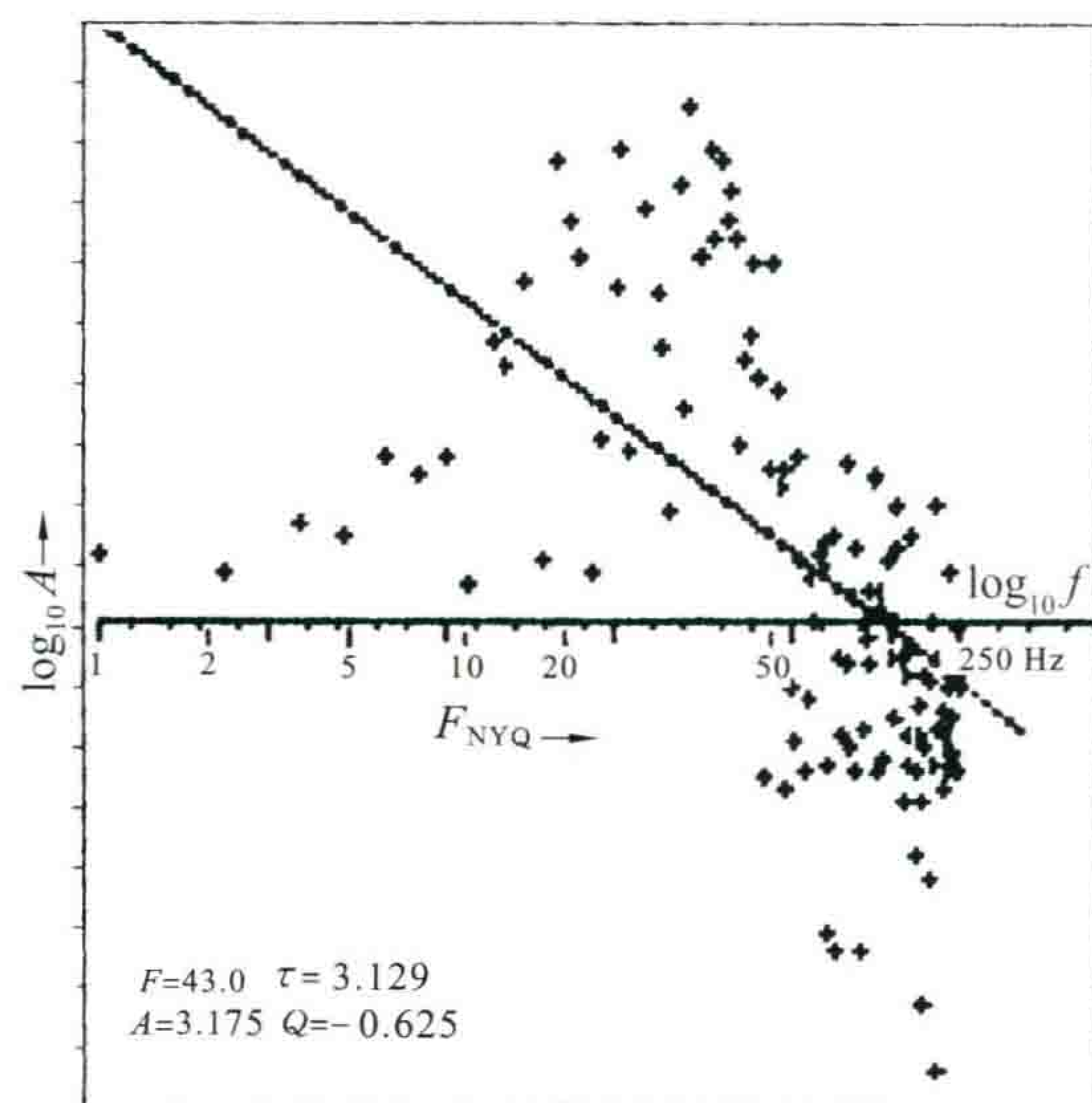


图 29 加上 10%自然环境噪声的频谱情况
参见图 21 中曲线⑦

以上三个模型证明：利用地震道计算分维数，往往得不出合理的结果，它随环境噪声的大小而改变。此外，我还尝试用小时窗内的波形求取分维数，其结论也是如此。

2. 实际地震剖面上的维数计算

为了进一步验证这个结论，我尝试在一条实际地震剖面上求分维数的试验。L120 测线是华北廊固凹陷的一条反射地震叠偏剖面(图 30)，共有 151 道，4 ms 采样。我对其求各道的分维数(容量维)，然后将结果绘于图 33(a)中。为了与下面曲线进行比较，我把分维数倒过来绘了(向下是分维数增加)。然后将原剖面用两个滤波档作带通滤波：第一个采用 55～95 Hz 的带通，滤波后的剖面(图 31)是一片噪声(没有任何反射同相轴)，而其右下方的一片强干扰是剖面数据中的野值造成的；第二个滤波档是 75～120 Hz，滤波后的(图 32)主频更高了，也是一片干扰及野值乱跳。从中可以清楚地看到，这两张滤波后的剖面图所记录的绝不是来自地下的反射信息，而是一种干扰背景。

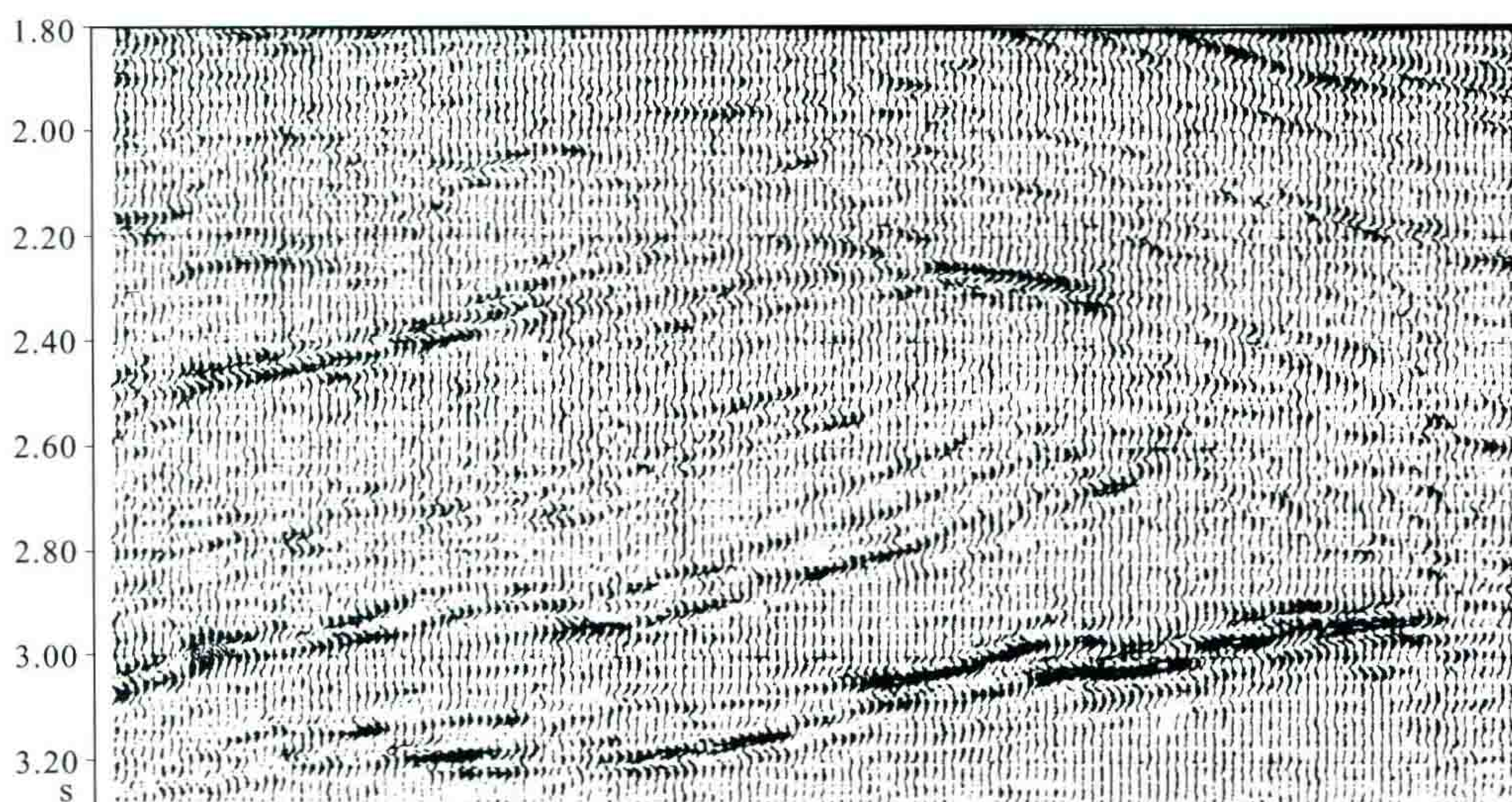


图 30　冀中廊固凹陷 L120 测线叠偏剖面

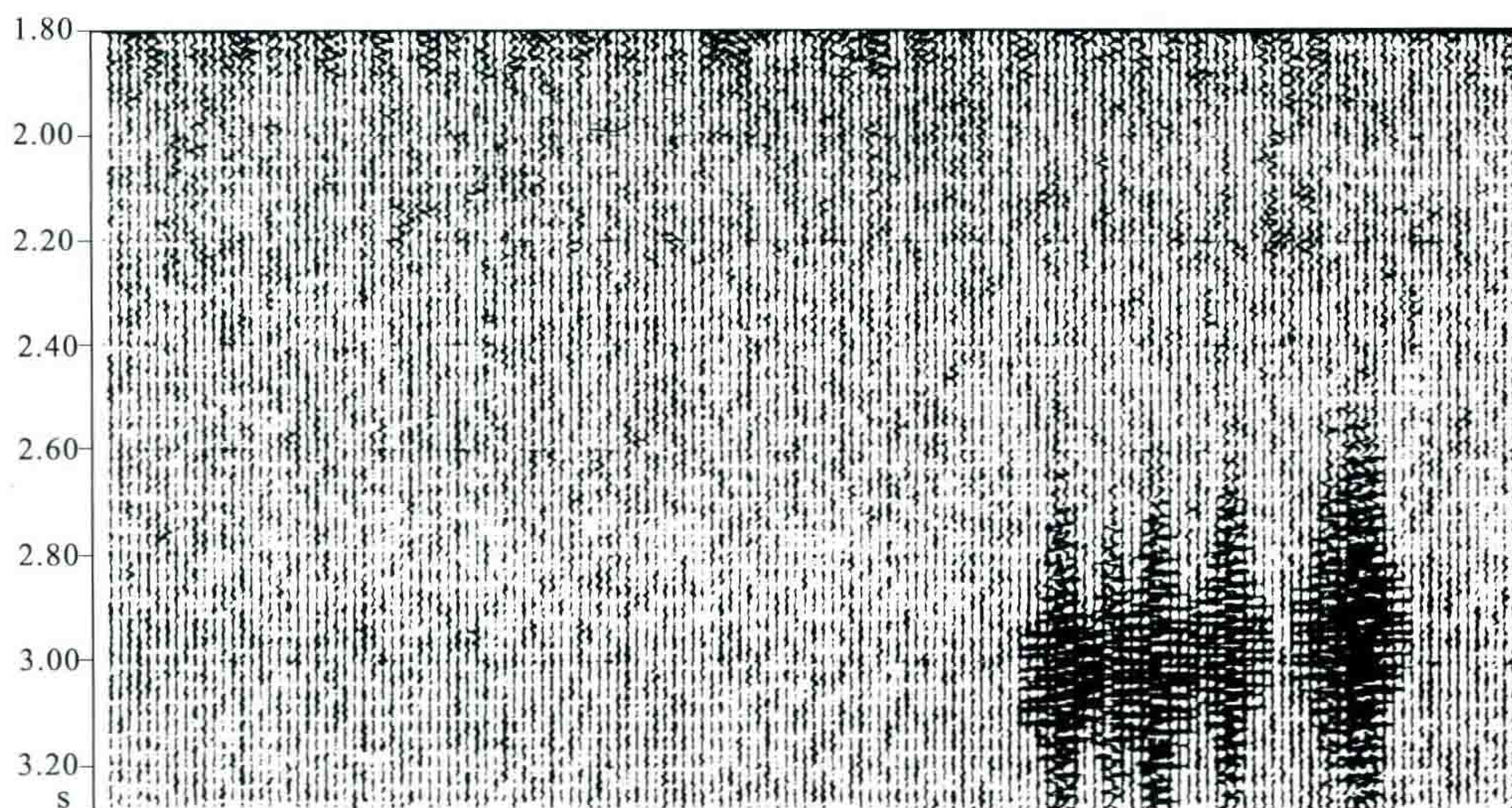


图 31　图 29 采用 55～95 Hz 带通滤波后的剖面

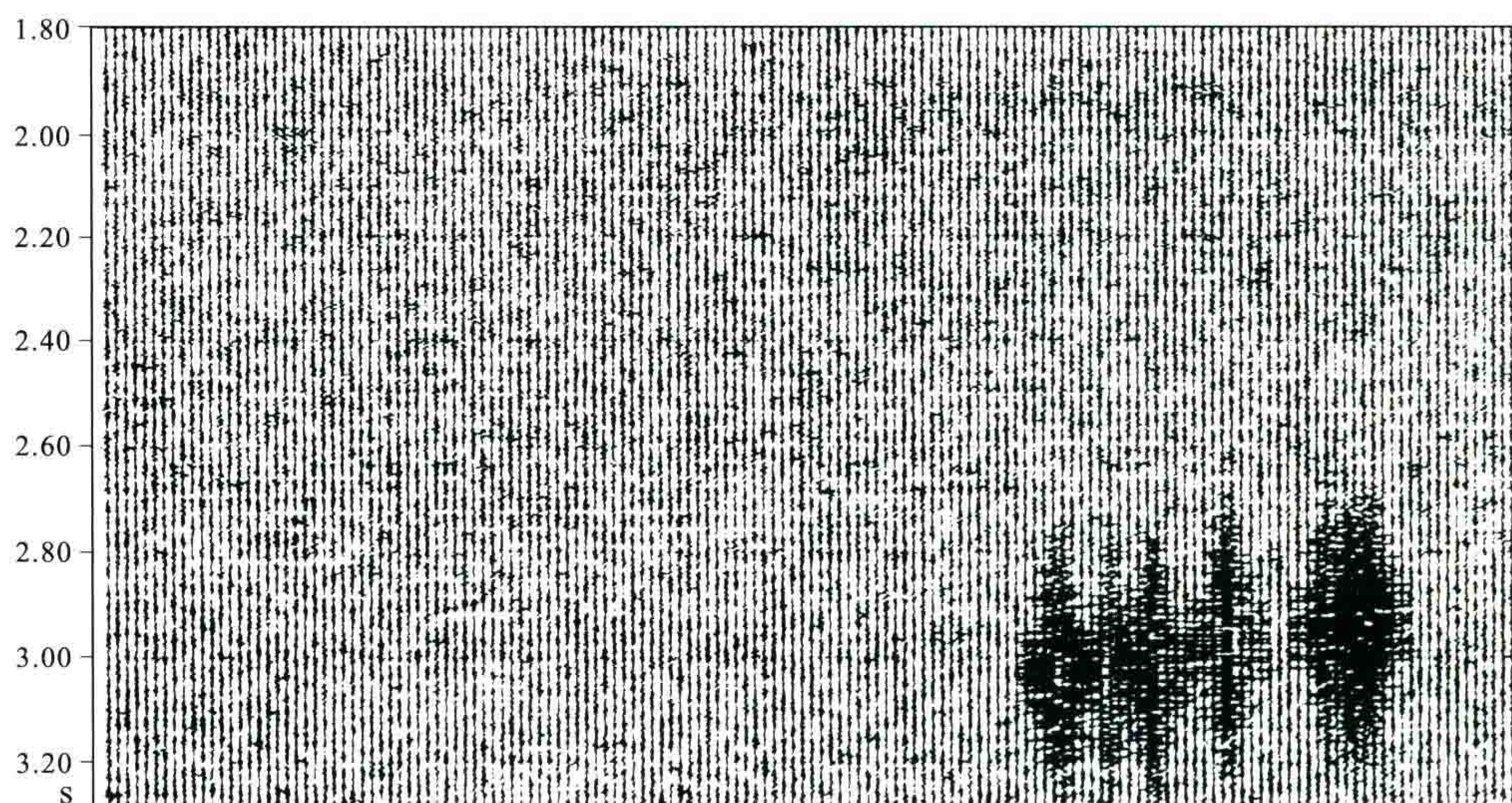


图 32 图 29 采用 75～120 Hz 带通滤波后的剖面

现在我把这两条剖面的高频干扰波的每道平均振幅打印出来，并且绘成曲线，如图 33 中的 b 与 c 两条曲线。它们的形态与分维数曲线的形态几乎完全一致，每一个起伏都大致一样。由此证明，在普通的叠偏剖面上，实际上分维数的变化反映着高频干扰波的强弱，并不反映地下的含油气性或者有无裂缝带。

在图 32 的最下方一条曲线 d 是未经高频带通滤波之前原始叠偏剖面上各道振幅的平均值，可以看到它与分维数曲线却无任何对应关系。然而曲线 d 才应该是反映图 30 地下的信息的。这个道理是极易明白的。当前我们地震剖面的分辨率提不高的主要原因，就是因为高频干扰压不下去。而分维数恰恰反映了地震道中高频干扰的变化，它与施工中地面的风吹草动有关，根本不是与油气或裂缝有什么关系。然而，目前已经有不少文章的作者说：他们在陕北找天然气方面，在四川找裂缝，以及在胜利油田埕岛油田找上第三系油气富集区方面都已经取得了成效[2,4,5]，这是值得怀疑的。

我建议上述论文作者也用高通滤波把 60～120 Hz 的波形滤出来，算一算每道的平均振幅曲线，看其是否与分维数曲线基本起伏一致。然后再看一看这个高通滤波档上，究竟是否有地下来的反射信号，问题便清楚了。

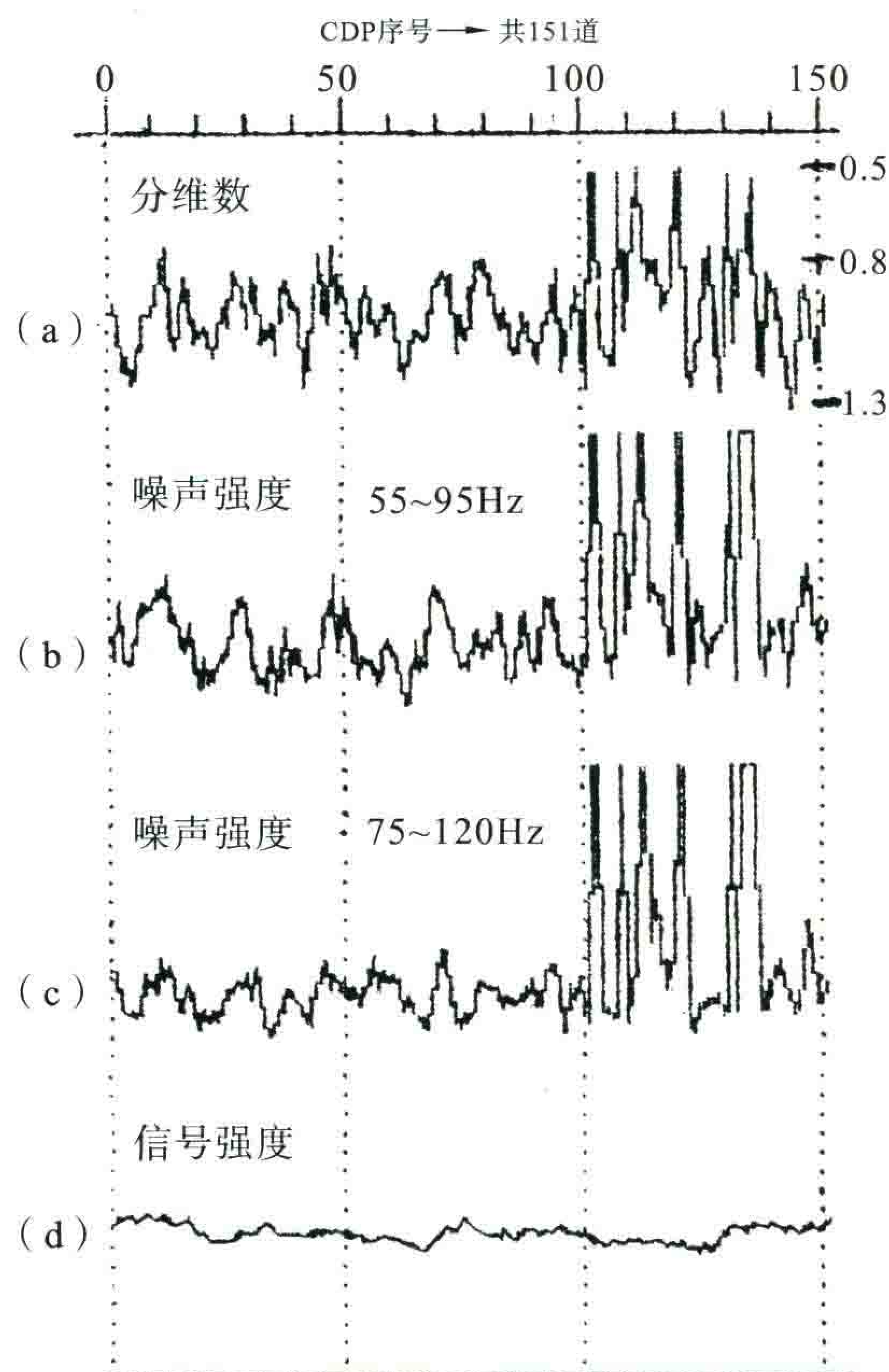


图 33 地震道分维数与环境噪声的关系

(a) L120 测线上实际计算的各道分维数(倒绘)；
(b) 55～95 Hz 带通滤波后的各道平均振幅；
(c) 75～120 Hz 带通滤波后的各道平均振幅；
(d) 原始叠偏剖面上各道的平均振幅(信号为主)

3. 陕北找气的例子

图 33、图 34 是引自文献 4 中列举陕北两条地震剖面上的分维数计算实例。上方是地震反射剖面，下方是该文作者计算的容量维(即频率域分维数)及关联维曲线。这两种分维曲线有着较大的差别，该文认为容量维更可靠。这两个剖面通过 7 口井，似乎容量维的高值区与含气富集区十分符合。该文认为图 34 中的剖面(位于小沙漠区)信噪比较高，所以容量维与关联维比较吻合，而图 34 中的剖面穿过黄土梁，信噪比低，所以关联维与气井产气情况吻合不好，而容量维仍旧有较好的反映。图 35 也引自文献 4，它是陕北 NR 地区

所求容量维(即频率域分维数)的分维数等值线图。该文认为高产气井(储集厚度大于 20 m 者)的分维数值都大于 3,而储层厚度小于 5 m 者,其分维数小于 3,已有 8 口井证实。

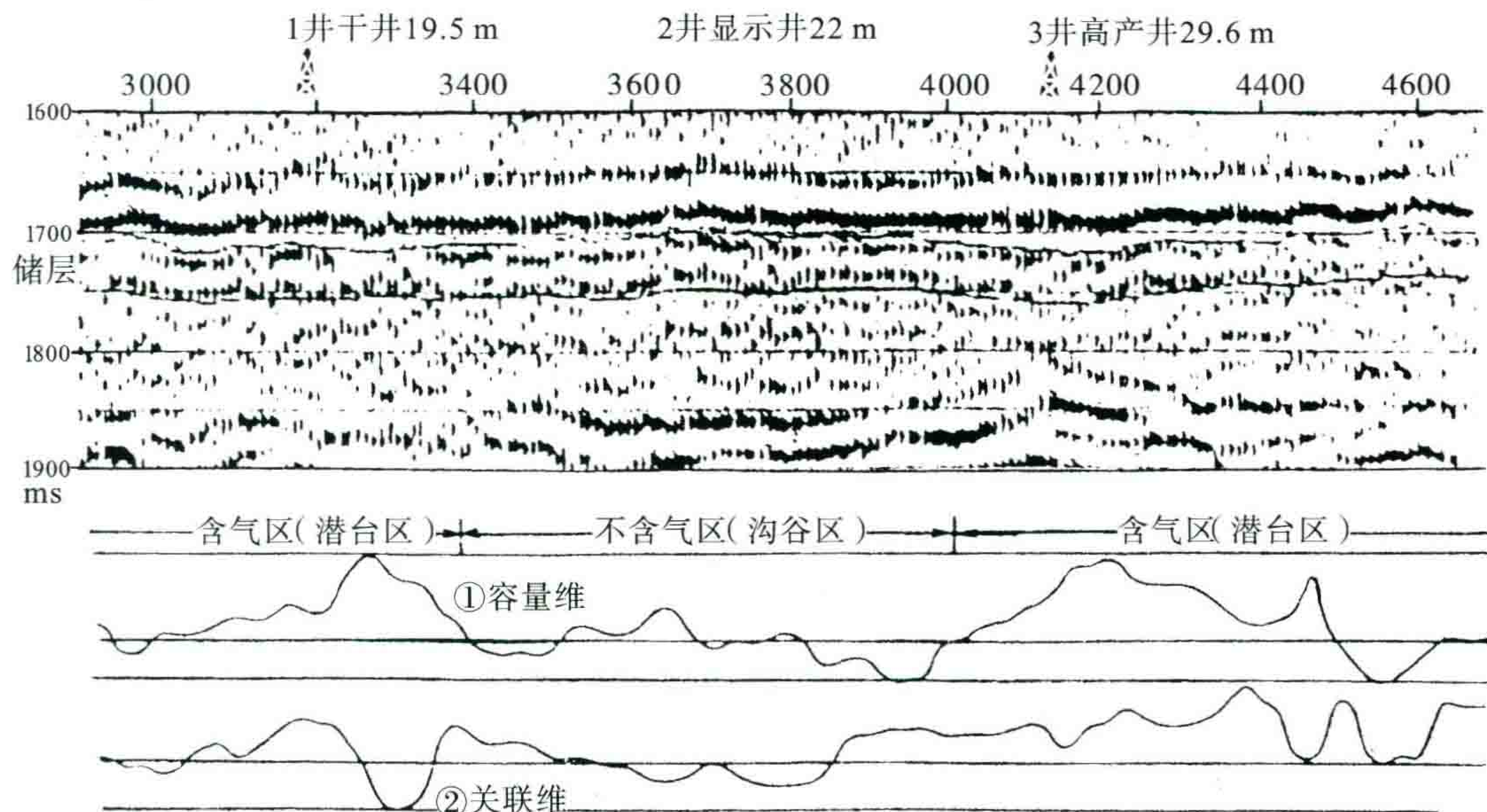


图 34 某剖面的分维曲线及检测结果

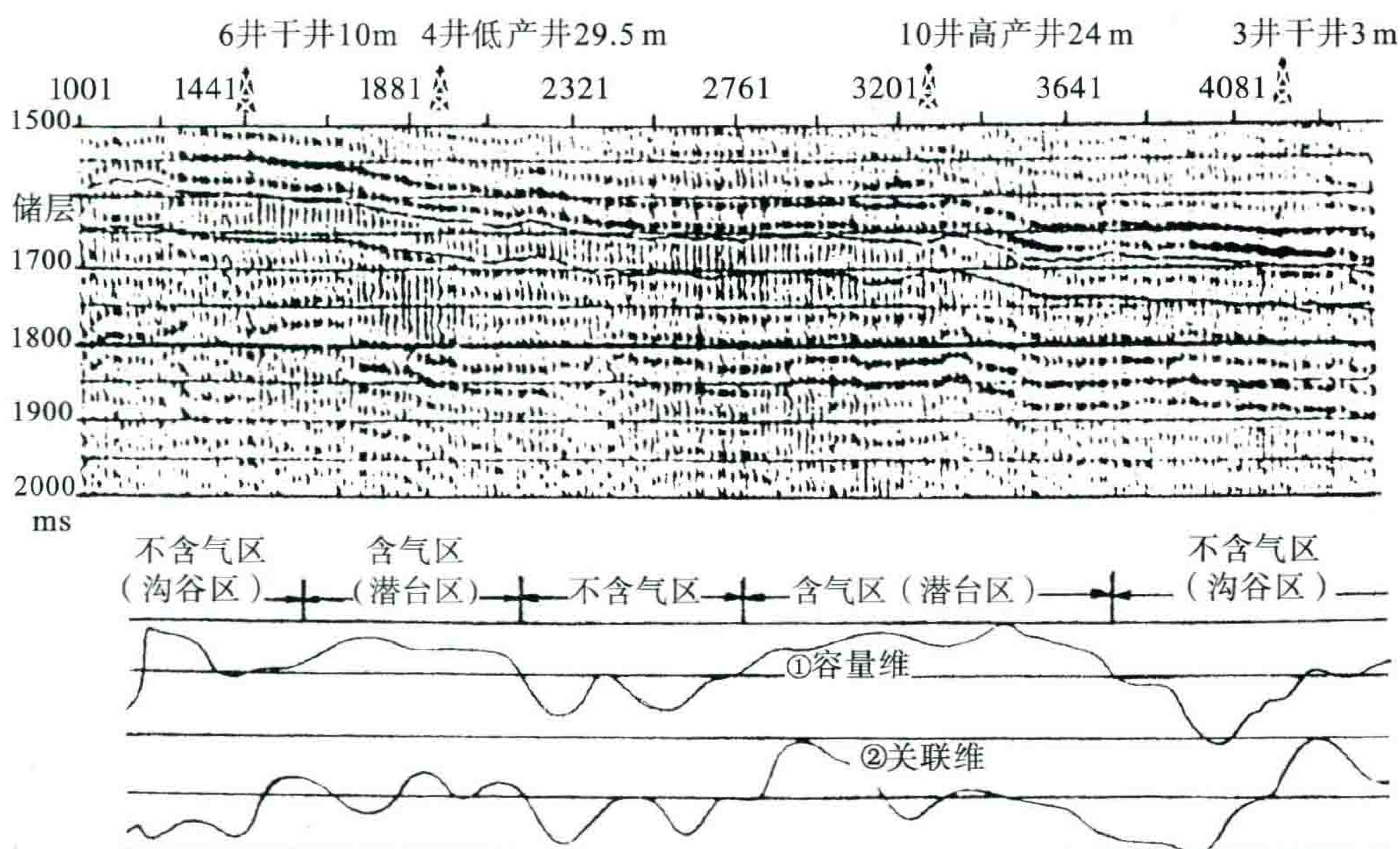


图 35 L53 剖面的分维曲线及检测结果

由于效果是如此之好,该文认为:“分维能更加准确地反映波形本质特征和油气藏本身的变化,是一个比较好的油气检测方法”,因而认为该方法已经可以推广应用。

我对这种分维数与含气程度的吻合现象表示怀疑。如前所述,因为地震曲线的分维数是不可能大于 2。绘在平面中的任何复杂曲线,它的分维数绝不能大于 2,也不可能小于 1,否则就违反了分形几何的最基本概念。此外,我对图 34、图 35 中根据地震剖面定出的“沟谷区”也表示怀疑,实际剖面上是看不见有什么“沟谷”与“潜台”的。

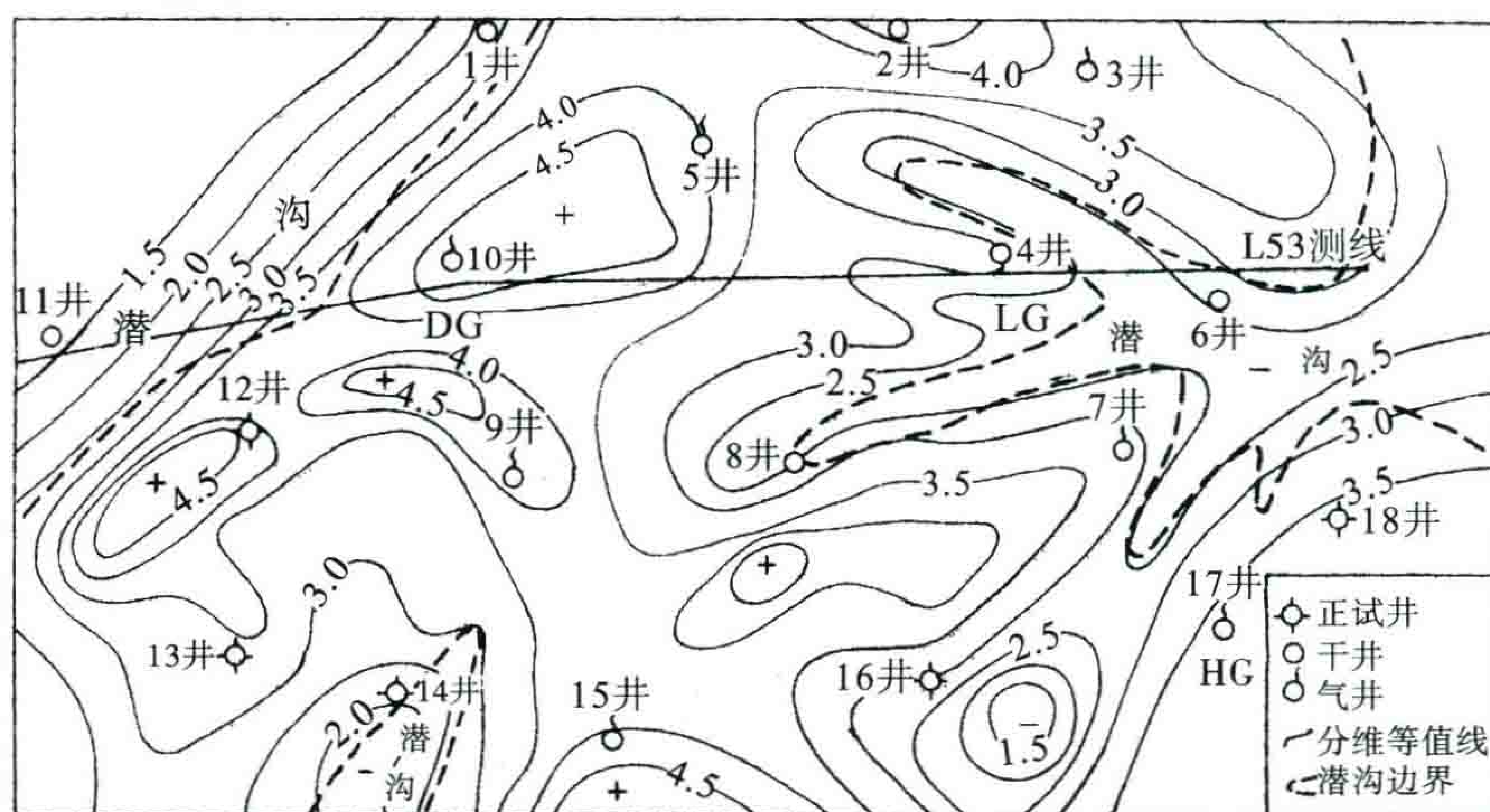


图 36 NR 地区容量维分维等值线图

据说该文作者是根据 T_9 强反射波后面的一个弱相位的特征而确定沟谷的，但这个弱相位是很不可靠的。我曾与陕北科技人员讨论过："地震勘探的精度是很难达到半个相位的，因为目前最精细的地震反褶积处理也不可能把子波压缩到半个相位左右，强波的尾巴永远要淹没和干涉后面的一个弱相位，而且弱相位的抗干扰能力很差。"可能有人又要说："不管黑猫白猫，抓住老鼠便是好猫。"我将在另一篇文章中来讨论所谓"符合率"的真实含义。

五、分形内插能提高地震勘探的分辨率吗？

文献[3]的作者尝试用分形内插算法对常规地震道进行分形内插处理，其结果使"重建的声波曲线与实测的声波测井之间有着良好的相似性，其相关值可以达到 0.8 以上"。这是用分形技术来解决地震勘探问题的另一个有益的试验。但仔细地分析该文的具体作法，发现它并没有多大的进展。文中使用的分形内插方法，实际上是根据井中波阻抗曲线作为"特征点"来控制的，通过该文的式(1)到式(4)求得一组分形内插迭代参数：a_n、e_n、c_n、f_n 及 d_n。显然，这 5 个参数是不适定的，不同的参数值可以得到不同的重建声波曲线，也就是说它是多解的。此外，在该文的式(4)中还必须假设 d_n 是已知的。该文中没有说明如何确定 dn 值，估计是凭经验或者凭尝试而确定的。由这些公式确定的 5 组参数如果是从井中已知声波曲线出发的，那么，当然会使内插出来的曲线进一步向井中曲线靠拢。这是不足为奇的，因为迭代过程总是把数据向答案靠拢，并不说明是真分辨率的提高。此外，该文作者也发现，从这一口井出发求得的参数可能并不适用于其他的井，于是该文提出，在考虑多口井的参数时要找出相关值最大的井的参数作为计算分形的参数。但这种做法是否合理呢？值得怀疑。

从该文的实际例子(该文的图 5)来说，分形内插出来的曲线虽然分辨率似乎高了一些，但与具体井中薄层的波阻抗相比，却显得有些地方误差很大。由于该文图 5 中纵坐标不统一，不便于对比，我把该文图 5 中三口井的三种曲线两两相比较，用虚线和实线分开绘于图 36 之中。图中 IMP 表示地震本身反演所得的波阻抗，RSLC 是用分形内插重建的波阻抗，而 WS 是井中的实际波阻抗。从图 37(a)的三口井的曲线对比中可以看出，此次分形内插大致将原来比较光滑的曲线的一个隆起变换为两个峰。其中三个打×的峰值是分形内插造成的假分辨率，这只要对比井中实际波阻抗[图 37(c)]的粗实线便可以判断出来，所以，这种分形内插似乎是在人为地制造分辨率。因此，这不能说是"真分辨率"的提高。这种方法与 DELOG 等反演方法相类似，也就是等于用一种数学方法对高频信息进行一次猜测而已。它们都存在着多解性和不肯定性。

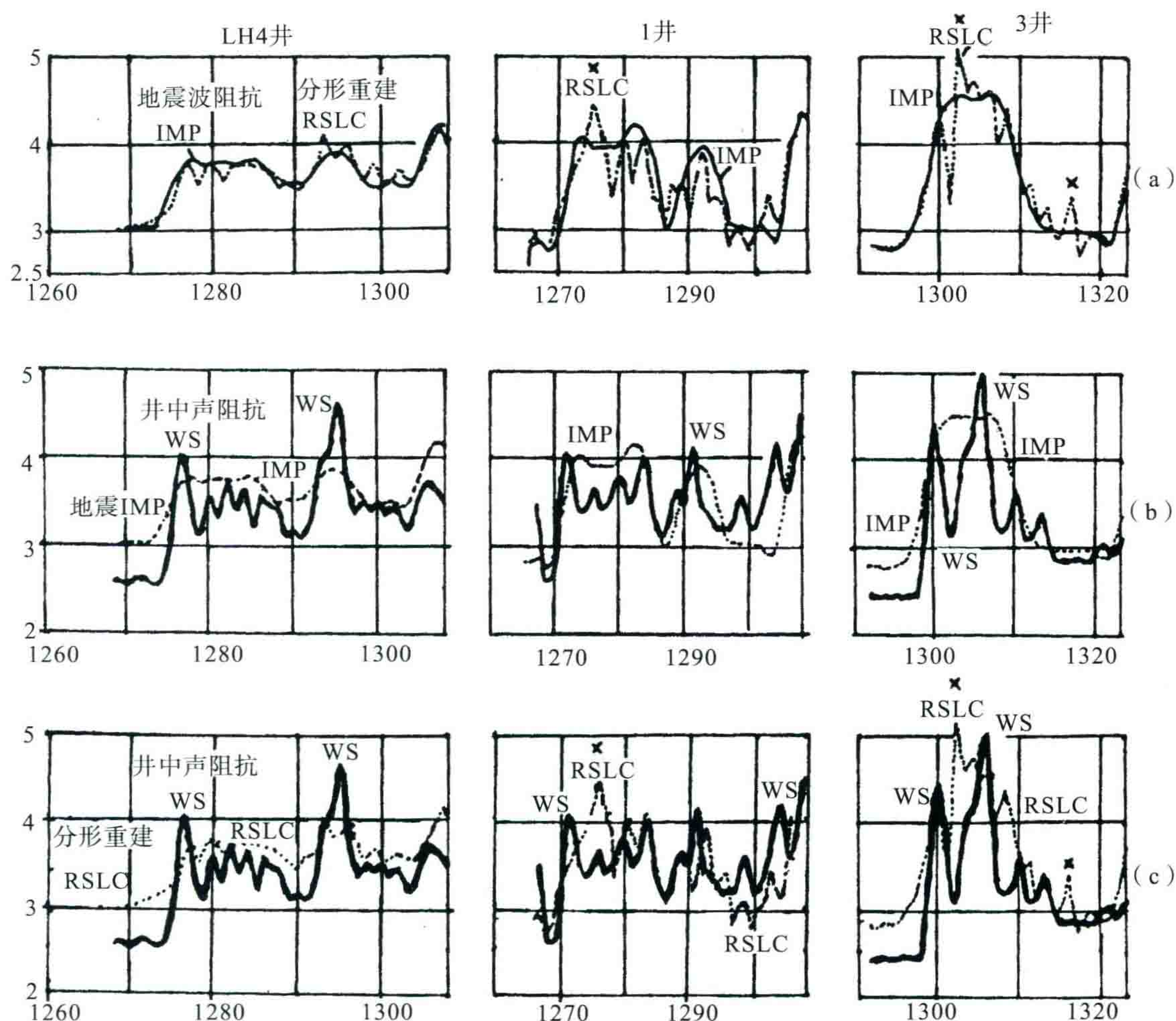


图 37 用分形内插重建波阻抗曲线(依据何光明等资料)

其中:WS 井中声波阻抗为粗实线;分形重建 RSLC 为细虚线

现在应该明白,要获得真正的分辨率的提高,不能仅仅指望用什么高明的数学方法,而是需要实实在在地从地震的采集及处理过程中不断地改进“信噪比谱”,这才是提高分辨率的正确方向。我曾经指出:“在信噪比小于 1 的那些频段中,愈是数学上严密的方法,得到的结果愈不可信”,“不从根本上去改变高频段(及低频段)的信噪比谱,只想通过数学的方法去作拓宽反演,这看样子是没有什么出路的”。[7] 我在这里再次重申,我绝对不是说分形几何不能用于地球物理勘探,而是说不能这样来用它。

六、历史的回顾

在几何学的发展历史上,公元前 400 年,柏拉图曾经夸大了几何学的作用。他在学院的大门上写着:“不学几何者,勿入此门。”这如果是出于对科学的尊重,倒是无可非议。但柏拉图之所以如此写,因为他认为几何学是他的哲学支柱。他认为:“世界万物都是由直角三角形所构成的,所以几何学是万物的本原。”[8] 今天,研究分维的学者 Michal Barnsley 也说:“分形无处不在(Fractals everywhere)”。如果从提倡把分形广泛地应用到更多领域,这也无可非议。但是目前那种认为世界万物都具有分形特征的思潮大概是错误的。至少,我认为地震记录的波形并不具有分形的性质,所以分形内插只是在制造“假分辨率”。

我认为地震道波形绝不具有“分形”的特点,因为地震道的波形如果是“分形”的话,那么就等于说地震记录的高频成分可以由低频部分来推知。如果此结论成立,我们今天也就不必再去搞高分辨率的攻关了。事实上,由于地震道的高频部分始终是干扰波占优势,所以每个频率成分的信噪比都得靠人们在采集及处

理中去努力提高。试图靠分形技术是绝对不行的。

Falconer 在他的书中对分形的作用曾经作出了比较客观的评语："实际上，自然界中没有真正的分形(正像没有真正严格的直线和圆那样)……尽管有一些自然现象已经用分形数学进行解释(布朗运动是一个很好的例子)，然而大部分的应用都倾向于'解释性'的，而非'预言性'的。"[6] 请大家注意他说的这句话。

我们可以赞赏利用分形构造的羊齿叶和小草(图 3)绘得这样美，但当你把它和现实生活中的羊齿叶和小草比较后会发现，分形图只能形象地"勾划"羊齿叶与小草的某些典型特征，但绝不能正确地绘出现实生活中的某一片实际叶子和一棵实际小草。因此认为"分形技术"可从宏观解决微观现象就以为可从分辨率低的资料来获得分辨率高的资料的想法是太天真了。

我想人们可以把分形技术用来构造无数个复杂三维空间中的砂泥岩互层的数学模型，这倒是十分快速而有效的。但这仅仅是模型而已，不要把它当成实际存在的东西。实际地下的微观现象还要靠我们下功夫，以足够的精度去采集可信的原始资料，并加以认真的分析，才能不断地加以深化认识。

最后，请允许我向近年来把分形、分维技术介绍到地球物理勘探领域中来的各位先驱者表示敬意。鲁迅先生就曾经赞扬"第一个吃螃蟹的人"，先驱者的实践使我们更深一步地了解了分形、分维技术的实质。

参考文献

[1] 李庆忠. "不要夸大分形分维技术的作用"[N]. 石油消息报，1993-05-10.

[2] 刘鸿祥. 用新技术、新方法提高胜利油田浅海石油勘探效益[C]. 中国石油天然气总公司全国勘探会议. 1995.

[3] 何光明，高如曾，韩德贵等. 用地震速度反演重建声波曲线[J]. 石油地球物理勘探，1994，29(2)：127-133. 北京：中国石油天然气总公司.

[4] 蒋加钰，段玉顺. 分形理论在油气检测中的应用[J]. 石油物探，1995，34(1)：47-51.

[5] 何光明，高如曾. 分形理论在裂缝预测中的尝试[J]. 石油物探，1993，32(2)：1-13.

[6] 法尔科内 K. 分形几何——数学基础及应用[M]. 曾文曲，刘世耀，等译. 沈阳：东北工学院出版社，1991.

[7] 李庆忠. 走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析[M]. 北京：石油工业出版社，1993.

[8] 中国科学院技术自然科学史研究所. 科学技术的发展[M]. 北京：科学普及出版社，1982.

附录 1：

文章编号 305-2



“不要夸大分形、分维技术的作用”



附录 1　——“不要夸大分形、分维技术的作用”

此文是我发表于《石油消息》报 1993 年 10 月 6 日的短文。

附录 2　——“分形、分维”必有可为——就《如何正确对待分形、分维技术》一文与李庆忠同志商榷(欧庆贤、王嘉松、汪惟成)

此文是对我文章的质疑，1997 年 1 月 1 日发表于《石油物探信息》。

附录 3　——以求实精神对待分形、分维技术

此文是我对质疑文章的答复，1997 年 5 月发表于《石油物探信息》。

《石油消息》报编者按：此次“分形”等技术笔谈已发表了 22 篇文章，参加笔谈的绝大多数同志对发展“分形”技术持赞同意见。李庆忠同志也肯定了“分形”技术的应用价值，但他还提出了一些值得注意的问题。我们刊登此文，如下。供广大读者参考。

自从罗巴契夫斯基创立“非欧几何学”以来，“分形、分维”是几何学中另外一绝。它利用了“自相似性”的概念又一次冲破了欧几里得几何学的束缚，使人们可以用简单的几个参数描述复杂的图形。1967 年首次被用来研究英国海岸线的长度，取得了幂指数为 $\log_{10}4/\log_{10}3$ 的粗略估计，从此得到人们的重视，并且近年来得到不断发展。这无疑是值得高兴的，但我们必须清醒地认识到它不是万灵药方。“分形理论”只是提供了一种对客观复杂事物加以“描述”的“理想化”的估计。这种“描述”并不等于“客观真实”。有人夸大了“自相似性”假设，认为世界上复杂的事物中都有着自相似性。例如，太阳系与原子结构很相似，但是他没有想到原子结构与分子结构就相差甚远；分子结构与细胞构造更极不相似，细胞与生物个体更不相似。怎么能够用简单的“自相似”“自组织”的假设到处套用呢？

不少人认为有了分形技术就可以解决人们对复杂的“非均质体”的认识，对“微观的构造”作出判断，或提高图像的分辨率。我认为这是值得怀疑的。

让我们设想一下，如果有谁用分形技术把一张五万分之一的地形图上的海岸线按照分形理论内插出一张一万分之一的海岸线地形图。然后，根据它去指挥一次海军登陆作战，那么，这次战役恐怕将出很大的洋相。

同样的情况，在研究油层的“非均质”现象时，分形技术能帮助我们在只有少数钻孔的条件下，对“非均质储集体”作出一定的估计与推测，从而迅速作出油田的初步开发方案，但是这不等于非均质问题已经解决。如果在后来的开发过程中，按原来分形的推测结果去部署配采注水，则也一定会引发不少失败。

裂缝系统可能应用分形技术最为合适。因为裂缝与大小断层往往具有某种相似性，但是断裂的产生

与岩石本身在地应力条件下的破裂强度有关。岩石的破裂强度又不会因为几何尺度的大小而相应地缩小或放大,所以大、小断裂的自相似性也就成了问题。这个问题不从岩石的力学性质着手,而指望单纯从分形几何得出正确的答案,恐怕也欠妥当。

最近,据说有人将分辨率较低的地震曲线用分形技术处理得到了分辨率较高的曲线,并且和声波测井曲线基本一致。这是不可思议的。我在1993年出版的《走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析》一书中在对分辨率问题作了论证后认为:地震勘探本身没有达到的分辨率,不可能通过什么高明的数学推算来获得提高;如果有些方法提高了地震勘探本身所没有达到的分辨率的范围,那么这种分辨率不是真的分辨率,而是"视分辨率"[即具有多解性,可能对,也可能不对,或者甚至是"假分辨率"(不可信的)]。在频率域用分维方法扩展分辨率,得到的是"视分辨率",而分形内插的方法扩展分辨率得到的是"假分辨率",因为分辨率是不能人为地制造的。此外,采用分维方法预测含油气及裂缝发育带也比较成问题,因为地震道的分维数测定不准,它主要受地震道中的高频噪声所控制,而高频噪声又常常由刮风微震所引起,与含油气及裂缝关系不大。

因此,我认为把分形、分维的作用过分夸大是不好的。数学是美好的,但不是万能的。数学只是我们的工具,有了工具就看你在实际中能否合理地使用它。分形、分维的长处是它可以用少数几个参数来"描述"一个复杂的实体,但是这种描述毕竟不是客观实体本身正确的写照。

附录 2:欧庆贤等人对我文章的不认同意见

文章编号 305-3



“分形、分维”必有可为

——就《如何正确对待分形、分维技术》[1]一文与李庆忠同志商榷

欧庆贤　王嘉松　汪惟成

李庆忠同志写了一篇引人思考的文章,他对将分形、分维方法应用于判别油气性、提高分辨力等问题提出了质疑。由于文章没有指出分形、分维这一有用的工具在石油地震中究竟应当怎样应用或怎样去探索其应用的价值,并过于肯定地震记录绝不具备“分形”的特点,这就很容易使人对石油地震领域中继续对“分形、分维”的探索感到茫然。文章对油气地震领域继续开展“分形、分维”应用的探索上已在一定程度上产生了负效应。

由此引起了我们对“分形、分维”问题的一些思索,形成了几点看法。

一、分形可用于地震数据压缩和地震反褶积

目前的分形内插如果在没有很好的约束条件(可靠的已知数据、有限尺度、一定度量范围)下,是难以获得比地震“原始数据”更高分辨力的有效资料的。但是,分形技术还是可以考虑应用于石油地震数据压缩的。因为我们可以把数据地震剖面视为图形,应用分形压缩方法实现数据压缩。数据压缩是当前一项重大的工程技术,目前国外已能将海上 3D 地震数据按数十分之一甚至百分之一的压缩比进行压缩。我国早在多年前已对地震分形图像压缩方法进行研究并取得肯定的结果[2],但总的来说是起步早、应用差、提高慢。因而,这方面的工作还应作进一步的研究和总结分析,从而更全面地确定其应用的条件,建立科学的检测、判定和步骤,配置适于在各种采集条件下取得的数据都能使用的系统,并不断提高对数据的压缩能力。而当前更重要的是产业部门应更主动地重视对此技术的试验应用。此外,基于地下介质的反射系数具备分形特性。人们已提出比常规地震反褶积适应性更大的分形反褶积方法[3]。通过一些实际材料的检验,它比常规方法的效果更好。

二、不要放弃应用分形方法技术检验地质油气属性的研究

应用地震法检测地质油气属性是当今勘探开发中的热门问题,人们为此而研究了种种方法技术,但至今这些方法技术的普遍适应性、可靠性、精细度往往不能如常规构造的方法技术成熟。因此,继续探索更多的解决此问题的方法技术有其重要的价值。

分形是研究传统数学所不能描述的极端复杂、极不规则的自然和社会现象的工具。地球在几何与物质属性上是一个非常复杂和很不规则的系统,因此通过人工地震收集到反映地球特性的某些资料应当可以应用分形学加以研究。分形学的创始人 B. B. Mandelbrot 从 20 世纪 60 年代开始就一直在这方面做实际的研究工作,随后其他人也进行了研究。他们的工作都证明了反映地球性质的地球物理数据是具有分形特性的[4,5],从而使得这种认识不是建立在一般的思维推理基础之上。所以,分形方法除了可用于研究地质的几何特性如断裂、裂缝等外,也可视为探索检测判别地层油气属性方法之一。

声学研究表明，应用线性参数，往往只能确定被测目标的大小和分布，而对确定其内在性质却往往不够理想。但有些检测目标(例如肿瘤)需根据非线性参数确定其性质，因此建立测量煤质非线性参数的方法将可为直接检测判别目标性质提供新的可能。分形、分维是属于非线性系统范畴的方法。石油地震的很多研究思路、结论、基本方法和技术常常来自声学研究成果。因此，在暂时没有条件或未能及时去完成探明我们的研究对象(或资料)是否完全具备分形特性或是什么条件下具备分形特性的情况下，引进相关领域的研究思路、结论和方法应是可取的途径。这一看法从地震勘探数字处理技术的产生历史过程也足以说明。气象记录曲线变化与地震曲线变化的相像，使人们产生了联想，提出有没有可能使天气预报的工作方法应用于地震资料处理。Robinson 根据 Weinerlevinson-TurRey 方法开始进行了地震数字滤波的研究，随后发展了地震反褶积技术，进而促进了地球物理界大规模的数字革命。这样的研究方法，在很大程度上都没有涉及地震波形成的物理本质，但它却取得了很大的实际效果。分形的应用研究在某种程度上也会如此。

当然，人们还是要问，在油气区中观测到的地震图像，究竟有没有可能具备分形的特性？虽然已经给出回答，认为在一定条件下是分形的，[6,7]但事实上根据目前极其有限的研究资料，我们还很难对此给以完全的回答。不过，现在人们都了解到，在实际油气储层中，其内部的结构和性质往往是难以用层状均匀模型加以描述的。它不会是绝对均匀的岩性、含油气性和颗粒结构，它是一个复杂的不规则系统(复杂的图像)，特别是考虑到油气对其储层以外的周围空间介质引起物理、化学反应，导致介质性质的变化后形成的空间不均质性，则更为复杂。显然，在此空间系统中的各种介质属性，会对地震波的属性有不同的影响。怎样研究这个复杂系统，传统的处理方法难以对付，因为欧氏几何的长度、深度、厚度测量都无法掌握不规则形状的本质。而分形则可能穿越混乱，走出一条出路，找寻各种不规则之间的共性。它可能在一定程度上和一定条件下，反映出不均匀的客观真相，而实际上，目前也只有它能为我们提供描述客观属性复杂变化的有效工具，例如冶金学家已用这种方法对不同钢铁的表面作分类，其表面的分形分维值常常显示金属的强度。因此，我们有信心设想，受油气影响的复杂地质体，将可以用分形方法加以研究。

三、“三高”地震资料和科学的思维是应用分形分维方法的基础

分形分维方法在石油物探中有其应用的可能性，但又为什么会有被人认为应用失败的事例呢？问题可能是复杂的，答案也是多解的。但是，我们认为要使其应用能取得效果，首先是所依赖的资料应当是达到高信噪比、高分辨力、高保真度的水平和适应于分形处理的流程。因为资料如果不达到一定的净化水平，就很难说分形分维的特性是目标信息的反映；如果资料不具备相应的分辨力就很难说它能很好反映出目标的分形分维特征，这正如远看是“森林”，近看是“树木”一样的道理，远和近反映不同分辨力的观察能得到目标系统的不同特征；如果资料不具备高保真度就很难说我们能考虑目标对地震波动力学特性会引起什么细微变化影响，而没有合适的处理流程也会难于判别和提取合适的信息。因此，和常规的认识一样，分形、分维的应用也应当建立在“三高”的资料基础上(而且可能要有更高的信噪比)，不要把二者对立起来，不要为此而放弃对实现“三高”标准这个长期课题的努力。这样人们也许会问，既然已有“三高”的基础，又为何要去应用分形分维呢？这实际上是两回事，因为实现了“三高”并不等于我们能有更简捷的、更易于量化对比的方法去描述、去反映复杂系统的不光滑的、不规则的程度。例如，地震地层学的资料基础也是“三高”，而地震相的划分却还要利用经验性的复杂反射图形特征知识，从过去认为零乱的、无用的复杂地震图像中解释其地质含义，从而把地震勘探的能力提高到一个新的高度。如果只停留在“三高”上，我们就不会从实践中总结出这些极有实用价值的经验知识。其实和速度值一样，分形、分维也只是一个可能用来描述地震介质系统特性的定量化参数而已，它也可以和速度类似，并不一定和我们的“目标”有着绝对相关的关系，和能定义出许多不同的“准速度值”，“模糊分维”的提出就是一例[8]。因此，它只可能对一个非线性系统的复杂性在一定条件下作出量度，但它不可能反映复杂系统的全部特性或适应于所有复杂系统的研究。因为所有科学的观念和理论都具有局限性和近似性，它不可能提供非常完整和确定的理解，也

不可能提供在描述和被描述现象之间的完全准确的对应关系。因此，一些观念和理论是否实用，关键是它们能否满足我们所提出的有限要求。

数学上定义的分形在现实生活中是很难找到的，因为它是数学定义，例如 Cantor 集、Sierpinski 垫圈在现实生活中是无法找到的，但我们可以通过它们对应的迭代函数并在计算机上作出任意近似程度的图像。我们只能用上述观点认识自然现象中的分形，绝对不能绝对化。绝对化的结果不单可以否定分形方法，而且也可以否定常规的数学工具——微积分。微积分的理论基础是极限概念，“一尺之锤，日取其半”。以零为极限，我们怎能一半一半取下去呢？

四、应用时应考虑资料数据与目标尺度的匹配

人们都知道，在波动现象中，目标对波动影响的程度其中一个主要因素是与目标的大小和波长的比例有关。一般波长越小，探测的分辨力越高，也就是说，时间和空间的频谱越高，越有利于小目标的探测。这个原则，在分形分维应用时，也是要遵循的。因此，在目前“高分辨力地震”资料数据基础上，应用分形分维法去研究层内部的细微特征，会不很适宜。不过我们还应当在此基础上继续试验研究，这样会更有利于认识问题。此外，如果我们把砂体、油气储集体、油气晕甚至油气影响空间等较大尺度的目标作为被研究的复杂系统，也许会更有可能应用这些数据去研究这个系统的特征。因为长期的油气开发实践已证明，砂体、油气储集体和油气晕它们在空间的展布和性质变化往往是极其不规则的。人们在初期勘探中只是把这种不光滑性、不规则性加以掩盖而已。

同时还应注意到，一个系统也可能只是在一定尺度范围内会反映出分形的性质，但如何在实际应用中确定此尺度范围呢？这是一个要解决的问题。

此外，我们从数学上定义的分数维可以得出这样的考虑。对一集合用一尺度 r 去测量，测量的结果 $N(r)$ 对任何 r 都满足

$$N_{(r)} \propto \gamma^{-D} \qquad (*)$$

则 D 是该集合的分维数，关系(＊)称之为度量(标度)不变性。鉴于我们测试手段以及计算机和人的局限性，(＊)关系只能在 r 的某一区间$[r_1, r_2]$上满足，$[r_1, r_2]$称之为度量不变性区间。因此用计算(＊)式的分维 D 时，先要找出其度量不变区间，再近似地求出 D 值。而任何计算分维的方法都存在度量不变区间问题，如何更好地确定此区间，也是一个实际应用中要解决的问题。

五、建立适应分形方法应用的流程

要应用分形方法就有必要选择一个较适合的流程，它首先要检验不同记录长度的原始资料的分形特性如何，大体确定应用的条件。分形小波分析的应用，可能更有利于这个问题的解决，因为应用小波分析能更快、更好地找出记录特性，并通过奇异性分析判别自相似性。为此可参考下述流程。

六、要从基础的和经验的两种途径去研究

严格地说当前我们对分形、分维在地震勘探中的应用还缺乏充足的依据(物理的和理论的)，因此，一些认识往往来自直觉，为了减少盲目性，开展一些基础研究是很有必要的。我们应当和岩石物性研究一样，进行在不同条件下的油气地震观测数据应用分形、分维的反应研究，并在此基础上进行数值模拟和理论的研究。但应用科学的发展史又使我们想到，往往在许多基本问题未得到探明时一种方法技术就会得到实际的肯定，中医针灸就是一例。因此，根据我国实际现状和本学科特点，我们在注意探索机理的同时要提倡不应忽略经验型的研究。我国前一时期在地震分形分维的应用研究中多数是带有这种性质，这是正常的情况，是加快对分形分维方法技术应用研究的重要途径，今后还应当这样去做。因为我们面对的是

一个非常规的图形，这样许多关键的新的实用准则和知识的形成，例如，如何判别资料是否不包含反映复杂目标系统的有效信息，在相当程度上还要依赖于经验性的研究。不过要取得很有用的经验我们还应十分注意提高经验性研究的水平和扩大面上的试验，应用多重空间的资料，并要注意做好仔细的分析、研究和总结，不宜把结论只是建立在最终单个剖面图像的简单相关之上。

如果我们通过两种途径展开工作，相信就能较快地得到较科学的结果。

结语

分形、分维法技术已经被引进到我国油气勘探开发领域，并引起了大不相同的评价。这是一件好事。希望矛盾认识会成为推动我国分形分维应用研究的积极因素，因为至今在石油勘探工业中分形分维技术应用仅在探索中，尚未成熟。对它的适应范围如何（含地域），有效性如何，应用条件如何，在什么有限尺度内可近似为分形，是否有其现实的应用价值等等问题，都还未得出明确的结论，急需人们去逐步明确。为此，我们还应当探索其实用性，探明其“无为”与“有为”两个方面。

地球介质是复杂多变的，我们研究的现象也是十分复杂的。为此，我们不能对分形分维在油气勘探开发中应用效果期望得过高；要求得过高，也不要忽视其可能的重要价值。但我们认为，它在石油物探中是一定会有可为的。因为和地震“亮点”方法技术相似，“亮点”技术在墨西哥湾的应用，其判别油气的符合率也只是达到50%左右，这已能被我们视为一项重要的新方法技术。今天我们在分形、分维研究的道路上已开始迈步，我们应当继续向前走，把分形、分维的应用研究持续下去，并尽可能地把各种可能性限在较小的范围，以便较易对问题做出最后经验判别。但即使是这种作用，它要得到普遍的承认，成为地震多参数（方法）的一个重要参数（方法），估计还要经历一段时间的实践。

分形、分维怎样才能在石油物探生产中得到应用，还有待于我们开拓。它需要各方面的支持，但对任何开拓，不可能在完全明白时才向前迈进。我们现在还不能确切地预测到其最终结果如何，但对这一耐人寻味的新学科，具有坚定信念、不怕失败的人们，应当继续“学”与“干”。

参考文献

[1] 李庆忠. 怎样正确对待分形、分维技术？[J]. 石油地球物理勘探，1996，31(1)：136-160.

[2] 纪辉，王嘉松. Wavelet Transformation in Fractal Image Encoding [J]. Numerical Mathematics: A Journal of chinese Universities, English series, 1997, 6(2): 176-183.

[3] 李学勤，张向君，吴志强. 分形反褶积[C]. 东部地区第八次石油物探技术研讨会，北京：中国石油学会各油物探专业委员会，1996.

[4] 王大兴，雷晓，潘存焕. 分形反褶积方法研究及应用[J]. 石油物探，1996，35(4)：1-10.

[5] 肖尔茨 C H，曼德尔布罗特，等. 地球科学中的分形研究[M]. 刘祖荫，皇甫岗，崔增林，等，译. 北京：中国科学技术出版社，1991.

[6] BARTON C C, LA POINTC PR. Fractals in the Earth Sciences [M]. New York: Penum Publishing Co, 1995.

[7] 曾锦光，舒雅琴，金中勇. 地震记录的分形与混沌性质[J]. 石油地球物理勘探，1995，30(6)：743-748.

[8] 汪富泉，罗朝盛，高如曾. Hurst 指数与容量维在油气检测中的应用[J]. 石油地球物理勘探，1996，31(2)，184-189.

[9] 胡远来，姜若维，胡春湾，等. 模糊分维的算法及其在油储识别中的应用[J]. 石油地球物理勘探，1995，30(5)：645-652.

附录 3

文章编号 305-4



以求实精神对待分形、分维技术

——答欧庆贤等三同志的商榷一文

1997 年 1 月 1 日《石油物探信息》上刊登了欧庆贤、王嘉松、汪惟成三名同志的题为《"分形、分维"必有可为》的与我的商榷文章[1](下简称《商榷》一文)。该文一开头就指出我 1996 年发表的《怎样正确对待分形、分维技术》[2]文章中有两条毛病:第一,没有指出分形分维究竟今后在石油地震勘探中到底应当如何应用;第二,我过于肯定地震记录绝不具备分形的特点。并说由于我的文章的出现,已经使分形、分维的探索"感到茫然",已产生了"负效应"。

针对他们的这些意见,我读完后感到有必要作如下答复。

第一,我 1996 年发表文章(下简称为《正确对待》一文)中已经指出分形、分维是一种有用的数学工具,并指出例如它可以用来快速制作三维砂层分布模型,可用来做三维地震正演模型,以及在开发方案编制过程中对储层的描述作某种快速估计。同时我也并未否定它还会有其他用处。

《商榷》一文第一节就指出分形可用于地震数据压缩和反褶积方面,这很好。其实分形技术可能还能用在其他方面,我们无需一一加以报来,这好比我们没有必要对"黎曼几何""拓扑学"及"数论"等非要讲清楚它们在地震勘探中可以有什么样的用处一样。如果谁讲不清楚,也不等于得罪了"黎曼几何"。所以我的态度是,我们应该根据地球物理的课题去寻找合适它的数学工具,而不是反过来,只从某一个数学工具出发,非要找到它能够如何被用到地球物理的领域中来。后者是专门研究分形、分维的人的职责范围。

第二,我想特别强调的是,分形分维技术对复杂的客观事物只能作某种"解释性"的"描述",而并非"预言性"的写实。而"描述"不等于客观真实。所以分形、分维不可能用来"探明"微观现象。世界上所有精细结构,都要靠艰苦的调查与测定才能解决问题,光靠分形技术是不行的。并且那种认为世界上一切事物都具有"自相似性"的论调,是站不住脚的。[3]

我的这些话都是针对前些年里有些人把分形、分维提高到认为它是解决油田储层的微观现象的新式武器,而且引用了国外某专家的一句话:"明天谁要是不熟悉分形,谁就不能被认为是科学上的文化人。"

我不同意把分形分维的作用夸大到如此程度。后来紧接着引起了一阵"分形分维热":有的人用它来作油气检测及寻找裂缝,有的用它来提高地震道的分辨率,等等。一篇篇论文发表后,似乎真的还很灵验。各油田及院校竞相推出新的分维找油、找裂缝的方法。

我通过学习和论证后,发现这些方法存在着很多问题:用它做油气检测时,分维数主要说明了高频干扰的强弱;用分形内插预测裂缝及企图提高地震道的分辨率的办法,是在制造假分辨率。

为了防止人们对分维的迷信与误用,所以才下决心写了《正确对待》一文。在该文的末段,我还特意向研究分形分维技术的先驱者们致敬,赞赏他们敢于作"世界上第一个吃螃蟹的人"。

告诉大家,我对我 1996 年所写的 3 篇文章并没有寄托希望它们会给我带来鼓掌声,相反,我的确作好思想准备,打算遭到来自各方面的压力与责难的。去年我曾经与几位好友都表明了我的这种态度。在这个世界上,说好话、恭维话,说你的文章很好,这是容易得到赞许的;而说相反的意见却总会引起一场争论。不过没有什么,我还是欢迎大家的批评与指正。我相信有争议才能使问题愈辩愈明,这是件好事。

第三，现在来谈谈分形反褶积。近年来有些人尝试用分形、分维技术来对反射系数的功率谱作出某些估计，发展了所谓"分形反褶积"，我看它的效果是不错的。但是如果就分形本义来说，这种方法是违背了分形、分维的基本概念的。大家知道，反射系数序列的振幅谱是随着频率的升高而增高的。在双对数坐标中虽然能拟合出一条直线，其斜率可满足

$$P(f)\propto f^{\beta}$$

然而这个正的 β，它的分维数却是一个负数(因为分维数规定取双对数坐标中斜率的负值)。负的分维数是没有物理意义的：平面里能绘出一条反射系数曲线，它正确的分维数绝对不会大于 2，也不可能小于 1，更不可能是负数，否则便直接违背了分形、分维的基本定义。

因此，我认为目前所谓的分形反褶积其实与分形技术是挂不上钩的。它只是利用形式上貌似分维的公式对反射系数的谱作一次双对数拟合而已。这种拟合方式也不一定最好，例如，Walden 本人在 1988 年就利用一种二项 Z 变化的滤波器[它是(1,1)阶的自回归 AR 及滑动平均 MA 的最简单的模型]，可以满意地用 φ 和 θ 双参数来拟合反射系数序列的功率谱。它比 $P(f)\propto f^{\beta}$ 的单参数拟合方式更要灵活得多。我研究院赵波同志根据这种拟合方法设计了"蓝色滤波"方法，它可以纠正原先脉冲反褶积中对反射系数为白噪假设的某些缺陷。经蓝色校正后的地震道，其频谱是进一步拓宽的。所以，现在所谓"分形反褶积"的成果分辨率的提高，实际上就是蓝色校正的效果，只是拟合公式不同而已。所以我认为，所谓的分形反褶积，谈不上是分形分维技术在地震勘探中的推广应用，更不能得到反射系数序列或地震道的确具有分形、分维特性的结论。而且恰恰相反，这种负值的分维数是直接违背了分形原理的。

再说一遍，我同意分形反褶积的效果是好的，但我感到它"名不副其实"。迭代计算的工作量很大，而效果与简单的反褶积加上蓝色校正却基本相当。

第四，我仍旧坚持认为地震道绝不具备"分形"的特点，这点我在《正确对待》一文中已经表明了我的态度。理由很简单，因为如果地震道真的具有分形的"自相似"特点的话，那么，就等于说高频信号(小尺度)的波形可以由中、低频信号所推得——这正是某些人认为分形可以提高地震道分辨率的出发点和理论依据。我在文中已经指出这是不现实的。如果真的高频信号可以由中、低频信号加以分形内插而获得，那么，今天我们不需要再苦苦地去搞地震高分辨率攻关了。

第五，我认为，当前我们地球物理勘探的发展道路上，在我们学术界里，的确存在着一种"喜新厌旧"的现象。有些人热衷于搞新花样，欣赏新奇的名词和新的数学公式。而对于当前地震勘探生产中常见的难题，例如检波器的耦合谐振，爆炸、激发条件的改进，山区静校正方法，动静校正中的深层次研究，各种噪声的调查研究和克服干扰的办法，去噪过程中的信号畸变，成像系统的理论分析，偏移速度的正确判断定等重要课题，却较少有人作过细的、有分量的调查研究。我认为这是一种偏向，应该引起大家的重视了。

我不反对使用新的数学方法，但是我想强调的是数学仅仅是一种工具，它必须恰当地与物理的实质问题紧密结合，才会产生好的应用效果。在分形、分维的研究道路上更应注意这一点。

第六，《商榷》一文的第二节呼吁"不要放弃应用分形方法技术检测地质油气属性的研究"，如果作为泛指意义上的研究，我当然拥护继续探索下去。然而采用分维数的办法恐怕是很难成功的。不成功的原因与分析我已在《正确对待》一文中加以论证了。如有不同意见，请各位再次给予明示。

在我的《正确对待》一文中所列举的分维找油及提高分辨率的失败例子中，其根本原因并不是因为那些地震资料没有达到"三高"，而是因为地震道的高频端不可避免地要被微震干扰所占据。这不是你主观上想要三高就能达到三高的。尤其是"高保真度"，简直已经是一个被弄模糊的概念了。[4] 并且由于反射系数的振幅谱永远是不规则地上下跳动，造成地震道的振幅谱无法拟合出准确的直线形斜率值，以及地震道的波形里永远包含着高频干扰成分，这些特点恐怕是任何求分维数的改良的方法都无法绕过去的。

第七，《商榷》一文的第三节到第六节的内容不够具体，并且也大可不必。因为如果分形、分维只有在实现"三高"之后才行，或者如果必须通过《商榷》一文中所提出的特殊流程作特殊处理，那么，分形技术的推广也就太难了。

所以我并不认为《商榷》一文已经指出了分形、分维今后的发展方向。

对《商榷》一文的结论一节中的主要意思我是完全赞同的。它指出了分形、分维在石油物探工业中的应用"尚未成熟"，"仅在探索中"，指出"不能对分形分维在油气勘探开发中应用效果期望得过高，要求得过高，也不要忽视其可能的重要价值"。

我建议研究分形、分维的同志可以试试用分形技术来制作三维砂层分布的模型，从而计算反射系数，获得理论上的三维地震道数据，供方法论证之用。这种工作正是分形技术的长处。在我的微机上已经有8种根据Mandelbrot分形技术制作在屏幕上绘出各种复杂动画图形的程序。我认为分形、分维的主要发展方向应该是向图形及模型方面去发挥它的长处。

《商榷》一文的最后一段中号召"不怕失败的人们应当继续'学'与'干'"，可能这是为弥补我造成的负效应所发出的呼声，这点我赞成。

参考文献

[1] 欧庆贤，王嘉松，汪惟成. "分形分维"必有可为[N]. 石油物探信息，1997-01-01(1，2).

[2] 李庆忠. 怎样正确对待分形、分维技术[J]. 石油地球物理勘探，1996，31(1)：136-160.

[3] 李庆忠. "不要夸大分形分维技术"[N]. 石油消息，1993-10-06.

[4] 李庆忠. 对地震勘探的分辨率、信噪比与保真度的再认识[N]. 石油物探信息，1994-06-01.

文章编号 306-1

对宽方位角三维采集不要盲从

——到底什么叫“全三维采集”

这篇文章也是我的一篇争鸣文章。

在大家对国外流行的“宽方位角采集”一片叫好声中，我提醒大家不要盲从。

我指出海上地震资料主要是采用窄方位采集，其成像质量始终是上乘的。

我国有些人在西部山区也作宽方位采集，我认为这是自找麻烦，会带来许多问题。因为不同方位上地层新老不同，会产生速度场的方位多变，而且无法与裂缝系统的各向异性区分开。目前，宽方位资料看上去成像质量好一点，主要是因为成倍地提高了覆盖次数所得的好处，而对研究各向异性却没有太大好处。不研究各向异性何必用宽方位？

此文 2001 年 2 月发表于《石油地球物理勘探》第 1 期，作者李庆忠。

关键词

三维采集　宽方位角　窄方位角　观测系统

我国每年花在三维地震勘探上的费用不少于 2 亿～3 亿元，因此，三维采集设计的正确与否是至关重要的，它直接关系到成果的质量，关系到三维地震勘探的效益。然而，我不清楚哪年哪一个外国人提出了宽方位角三维地震采集方法，并认为它是提高三维地震勘探效果的新招，给了它一个“全三维采集”的美名（在美国又被称为真三维采集）。不少国内三维施工单位在做施工设计时都争相仿效，唯恐没能跟上这“世界潮流”。结果使得山区三维采集非纵距最大达 1.8～2 km，使资料处理结果变坏，损失很大。然而这股浪潮目前还没休止，所以有必要加以讨论，澄清概念。

一、野外现实剖析

以我国西部山区为例，假如构造走向为东西向，轴部出露侏罗系，翼部为第三系及第四系。如果采用宽方位角采集，地震射线在南北向侏罗系里穿过得多，其速度偏高；在东西向第三系地层里穿过得多些，速度偏低。假设非纵距为 2 km，南北向速度比东西向大 10%，则 1.5 s 的反射波在 x 与 y 两个方向上，同样距离的 2 km 处将产生 135 ms 的最大动校误差，使反射波无法叠加好。

有人想：“三参量（v、α、β）速度分析技术可能能解决这个问题。”然而三参量速度分析技术基本上没有得到工业上实际使用。原因有二：

（1）地层倾角大的地区，往往是速度横向变化大的情况，三参量速度分析公式中假定 v 是恒速，这已经不符合客观实际了。三参量速度分析把速度的变化硬当成是倾角的变化。当然，如果只是为了纠正动

校正误差，这也未尝不可，但是在解释 α、β 两个倾角分量时，增加了分析判断上的困难，有时会搞错。尤其是原始资料信噪比低的情况下，更是容易弄错。

（2）作三参量速度分析的计算软件有两种。第一种将整个象限划分为若干方位扇形，然后在每一个方位扇形中作速度分析。这样做当然数据比较全面而准确，但这种方法显然要求每个方位扇形中需要有足够的覆盖次数，并且要保持在每个方位角里炮检距分布要均匀，这往往是不大可能做到的。第二种计算方法不划分扇形，只是采用逐次改变不同的地层倾角 α 与方位角 β，作迭代修改，计算其叠加能量，根据能量最大准则判断叠加速度椭圆的倾角与方位。这种方法比较简单而实用，但头痛的是解释 v、α、β 三个参量需要极大的耐心，并且要反复检查（参看 1992 年《石油地球物理勘探》第 6 期张洪昌、康演巧《三参数速度分析及谱的解释方法》），你要针对速度、方位、倾角及多次波作综合判断。以上两种方法无论哪一种都需要很大的计算工作量。

所以，所谓三参量速度分析目前还很少有真正用于生产的。今后，除非其勘探的（各方位的）总覆盖次数达到 100 次，甚至 200 次以上，否则三参量速度分析没有实际意义。

还有不少人理所当然地想：地下信息来自不同方位角，用窄方位角（例如主要为南北向）做三维，成像肯定是不好的。其实这种想法是片面的，这种担心是没有必要的。因为沿着南北方向窄方位角布线，其地震射线主要在南北向剖面里传播（当然不一定在铅垂剖面里传播），要计算的均方根速度、偏移速度也基本符合南北向剖面里的规律，所以还是可以在南北向剖面中成像的，进而可在三维空间里成像。

请大家注意，海上的三维地震施工从来都是采用窄方位角，成像一直很好，不就是有力的证据吗？

如果采用三维一步法偏移，在建立速度场模型时我们是不需要考虑射线的方位角的，Snell 定律会自动解决方位角的影响。

宽方位角采集资料在道集中远炮检距的道数增多，这虽然有利于速度分析及多次波的压制，但同时也导致了叠加资料同相轴变宽和分辨率的降低。近年来，三维资料的主频愈来愈低，是十分遗憾之事。

1996 年 7 月，在 *The Leading Edge* 杂志上，Canning 和 Gardner 撰写了一篇文章：*Another Look at the Question of Azimuth*。他们指出了宽方位角的缺陷：对于叠前三维偏移来说，如果采用宽方位角常见的施工方式，一片砖墙式的所谓"真三维采集"会产生强烈的偏移噪声，使成像质量下降。他们得到一条结论："采用宽方位角采集，道集中任何方位角的不均匀所带来的问题与炮检距不均匀带来的问题是完全等效的"，所以他们主张采用窄方位角采集为好。当然，他们主要是从三维叠前偏移的成像效果来分析的。其实，我国西部山区目前 30～60 次覆盖的宽方位角三维地震采集，已经无法很好实现 CDP 的水平叠加。我们上当了，却还不醒悟。

什么叫"全三维采集"，没有人给它正确定义。我们不应该把它理解成"宽方位角采集"。20 世纪 80 年代早期的三维地震施工中，有一个常见的缺陷，那就是由于地震仪的道数不够，造成横向覆盖次数的不足（有的 y 方向只有两次覆盖），造成 y 方向的静校正问题不能妥善解决。即 x 方向剖面质量不错，抽成 y 方向后，其同相轴便呈锯齿形上、下跳动，这就是 y 方向静校正问题没有妥善解决造成的。因此，应该呼吁的是，三维地震的采集设计"必须强调 y 方向有足够的覆盖次数"，这才是全三维采集十分重要的问题。

一般地，宽方位角采集施工容易使 y 方向的覆盖次数增加，然而有人把这个优点归功于宽方位角采集，这是不公道的。因为在窄方位角采集的情况下，只要线束间将接收线作一定的重复，照样也能把 y 方向的覆盖次数增加上去。《石油地球物理勘探》1998 年第 6 期阎世信、谢文导两位同志的文章就举出一个冀东的 4 线 13 炮的窄方位角施工采集例子，其横向覆盖次数为 4 次，最大非纵距减少到 650 m，线束间重复 2 条接收线，线距为 200 m，炮距为 50 m，效果是很不错的。

相反地，同一期刊物上后面一篇文章，张庆淮等四位同志却极力推崇宽方位角，认为渤海湾今后需要用宽方位角重新作一次三维地震，认为它可以使复杂构造成像更好。对此，本人表示怀疑。最近还有人想利用宽方位角采集，进行不同方位的 AVO 研究，用以判断埋深 4～5 km 灰岩潜山里的裂缝发育方向。还有人企图用这个办法解决深部泥岩裂缝的发育方向。我认为，虽然有一定的道理，但恐怕很不容易实现。

所以在三维施工实践中，我们一定要从实际出发，不要盲从，不要轻信某些外国人的宣传，不要追随不现实的潮流。我们还是应该遵从客观实际，决定自己的策略。

二、具体建议

在这里提几点具体建议：① 三维采集方法方面最需要强调的是增加横向的覆盖次数，而不是强调宽方位角。② 在我国西部山区施工时，千万不要使用宽方位角采集，以免造成难以解决的速度场变化问题。③ 在浅层横向速度变化虽然不大，但倾角较大的地区（如吐鲁番盆地广大地区、塔里木盆地玛扎塔克、大宛齐）也不能使用宽方位角。④ 对于速度横向变化不大的东部地区（包括西部各大盆地中央平缓倾角区），宽方位与窄方位采集的效果基本无差别，只要强调横向有足够的覆盖次数就够了。宽方位角的野外施工效率可能稍微高些，但是如果今后要作叠前深度偏移，会带来更多的偏移噪声。此外，东部地区更没有必要因为过去是窄方位角，现在再用宽方位角重作三维采集。⑤ 为了研究各向异性，包括研究裂缝带的发育方向等课题，今后可能要采用宽方位角。但这个课题是比较遥远的目标，恐怕目的层埋藏必须很浅，覆盖次数大概需要一两百次以上，并且还需要探索几年，才有可能突破。

三、误念源于尽信书

有道是“尽信书，则不如无书”。有一本书可能在宣传宽方位采集上起着很大的作用——Cordsen 与 Peirce 所著的《陆上三维地震勘探的设计与施工》一书在我国广为流传，它几乎已经成为野外采集方面的教科书了。但此书有很大的片面性，它只宣传宽方位角采集，主张排列片的最佳横、纵比为 85%，而没有深入讨论其缺点。

此书中所说的“排列片的横、纵比小于 0.5 时，一般表明会产生静校正耦合问题”（中文版，涿州：石油地球物理勘探局，1996 年第 50 页），这句话是十分片面的。我们认为采用窄方位角采集时，只要在排列滚动时重复半个排列片的接收线，就可以达到增加横向覆盖次数的目的，并保持静校正耦合的良好特性。此书的第 21 页上的公式：横向覆盖次数＝接收线数/2，也是没有根据的。我与俞寿朋先生（该书中文版译者）讨论过，我们猜测，在这本书里，它已经自行规定了一种排列片滚动方式，即每次只滚动一条接收线，并且只放一条接收线中间的炮点。遗憾的是作者对此在全书中都没有做出明确地交待，所以引出不少结论可能是片面的。

1994 年，Lansley 通过分析宽方位角与窄方位角各自的优、缺点后，指出：“窄方位角排列片较有利于 AVO 分析、DMO 和速度横向变化显著的情况；而宽方位勘查则较有利于速度分析、多次波衰减及静校正求解，并且对地下采样的方向较均匀。”这段话前面指出的窄方位角的优点是正确的，尤其是速度横向变化显著的地区特别重要。然而关于宽方位角的优点的提法，我认为应该批判地接受。首先“有利于速度分析”这个提法是不全面的，宽方位炮检距的 x^2 分布比较均匀，这是有利于速度分析的。但是如果不同方位上有了速度差异，此时非但不能改进速度谱的质量，而且会变得更差。其次“有利于多次波衰减”这个优点不是最重要，因为窄方位角施工时，剩余时差是不变的，只要办法对头，同样也能很好地压制多次波。至于“有利于静校正求解”这句话没有说清楚，我认为只要横向覆盖次数提高了，那么窄方位角也能很好地解决静校正的问题。最后一点，“对地下采样的方向较均匀”这句话是有条件的，它只有覆盖次数在一两百次以上，三参量速度分析可以搞清不同方位角上的速度分布时才能适应，才能使不同方位角上的 AVO 或不同方位角上的各种各向异性信息有可能得到应用，用以研究裂缝发育带及其走向，但可能不是最近十年里所能够奏效的。

四、可供选择的观测系统

下面列出窄方位角的几种可供选择的观测系统，它们的最大非纵距不超过 675 m。每束完成后，只重复半束接收线即可把 y 方向的覆盖次数增加上去。

观测系统	接收线距	炮点距	最大非纵距	y 方向覆盖次数	地下面元横距
4 线 4 炮	100 m	100 m	450 m	$N_y=4$	$\triangle y=50$ m
4 线 8 炮	100 m	50 m	475 m	$N_y=4$	$\triangle y=25$ m
6 线 6 炮	100 m	100 m	450 m	$N_y=6$	$\triangle y=50$ m
6 线 12 炮	100 m	50 m	675 m	$N_y=6$	$\triangle y=25$ m

此观测系统仅列出了 y 方向的参数，x 方向的参数可自行决定。以下 4 种形式的最大非纵距不超过 975 m，也可参考采用。

观测系统	接收线距	炮点距	最大非纵距	y 方向覆盖次数	地下面元横距
4 线 8 炮	200 m	100 m	950 m	$N_y=4$	$\triangle y=50$ m
8 线 16 炮	100 m	50 m	950 m	$N_y=8$	$\triangle y=25$ m
4 线 16 炮	200 m	50 m	975 m	$N_y=4$	$\triangle y=25$ m
8 线 8 炮	100 m	100 m	950 m	$N_y=8$	$\triangle y=50$ m

结语

近两年来，大家从实践中已经开始认识到宽方位角采集的某些缺陷，并且不再迷信它了。但是最近还有人在青海的山地三维施工中采用的非纵距大到 1800 m，因此我认为，本文所提出来的问题，还有必要展开广泛讨论。

文章编号 306-2

再谈宽、窄方位角采集问题



就物理地震学的观点，地下信号的单元是一个绕射源，只要每个绕射源都成像了，反射成像的问题也就解决了。而绕射源是没有方向性的，地下每一个绕射信息到达地表的范围很大。只要两个菲涅尔带里采集的信息足够充分及分布均匀，不管宽方位角采集或窄方位角采集，收敛聚焦后，都能正确成像。

本文从理论记录的成像效果，再次指出：如果不研究各向异性，是没有必要采用宽方位角采集的。

中国石油大学(北京)的中国石油天然气集团公司物探重点实验室也用水槽物理模型，证明了“宽、窄方位角”地震资料采集，经三维处理后，获得同样的成像质量，对地下砂体分布边界也具有同样的分辨率。

文中提出具体建议，认为应该针对不同的地区根据实际条件决定我们的施工方案。

本文根据 2005 年 2 月及 2006 年 7 月两次发言报告多媒体资料整理而成。

前言

宽方位角与窄方位角各有优缺点，不要过早下结论。我认为，如果不研究各向异性，没有必要采用宽方位角，窄方位角也能查明砂体和小断层。

地下每一个绕射信息到达地表的范围很大，只要菲涅耳带里的信息足够充分及分布均匀，不管宽方位角采集或窄方位角采集，收敛聚焦后，都能正确成像。我下面将要证明：即使很窄的方位角，经过排列片的滚动，三维都能准确成像。

2001 年 2 月，我曾在《石油地球物理勘探》期刊撰文对宽方位角的问题进行了讨论，文章的题目为《对宽方位角三维采集不要盲从》，对到底什么叫“全三维采集”问题进行了讨论。总的意思并不想否定宽方位，而是强调不要盲从。

当国外提出宽方位三维地震勘探方法，并给出“全三维采集”(美国又被称为真三维采集)的美名后，我国都争相仿效，唯恐跟不上这“世界潮流”。在我国西部山区也采用了宽方位三维采集，由于分方位后覆盖次数不够高，速度场又多变，使资料处理结果变坏。所以，我认为有必要加以讨论，澄清概念。

一、宽窄方位角成像范围的理论试验

有人以为窄方位采集能够照明的地下信息范围是一个椭圆，如图 1 及图 2 里的绿色椭圆所示，而宽方位采集能够照明的地下信息范围是一个大圆(大红圈)，因此认为宽方位好。这是一个片面的理解，他们忘

记了“排列片滚动”的效果，见图 1 说明。

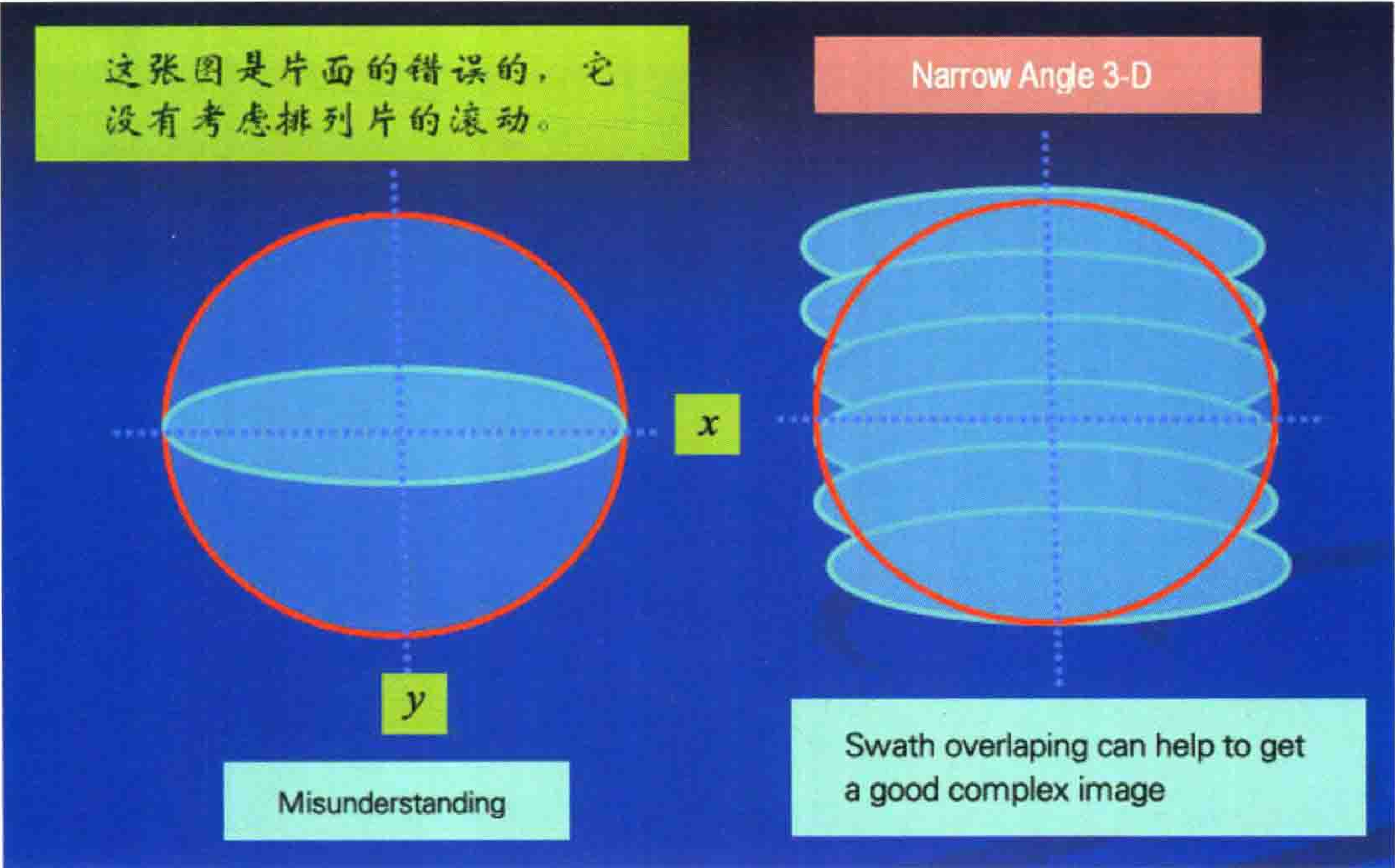


图 1 窄方位角与宽方位角对比示意图

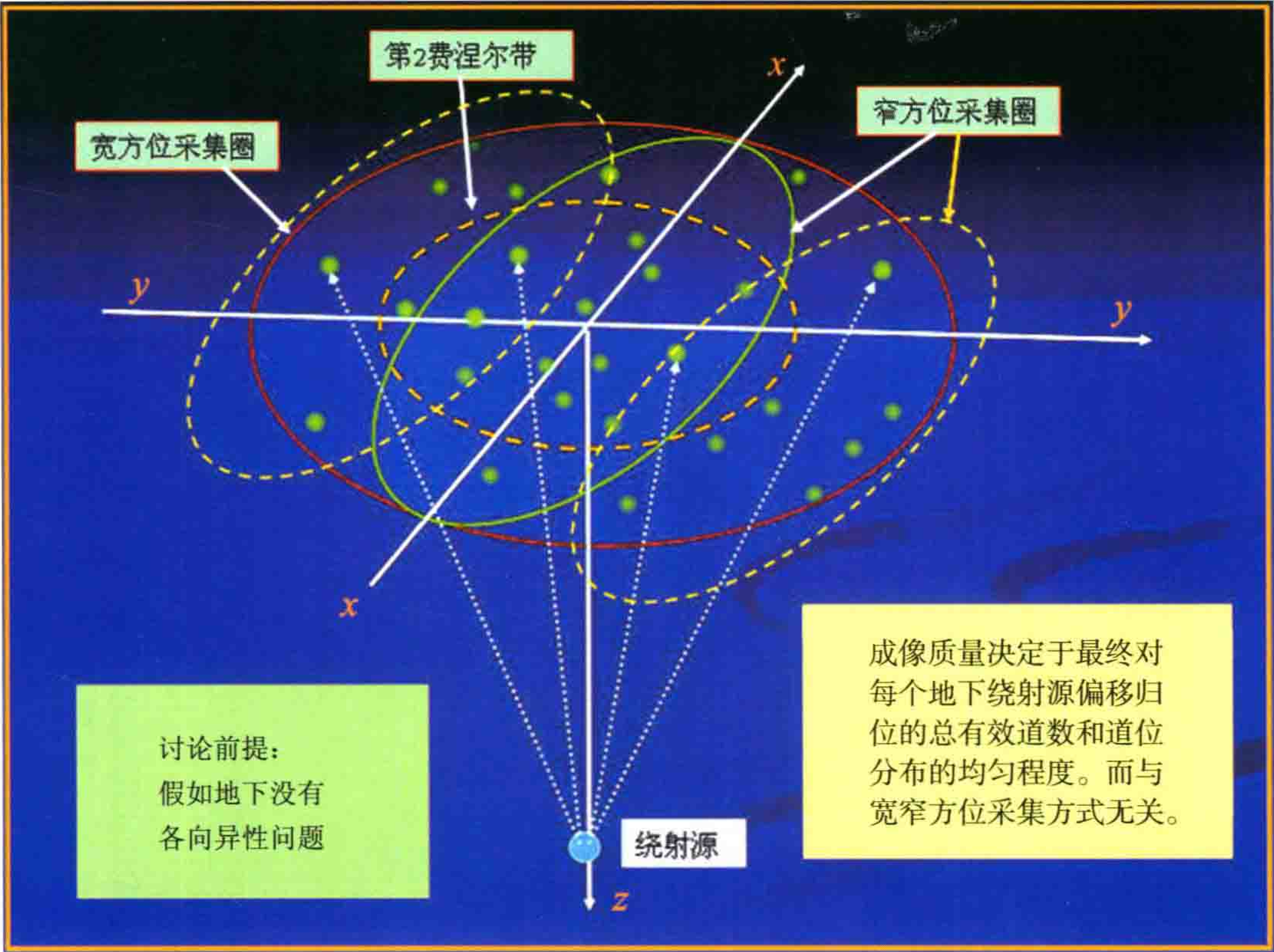


图 2 每一个绕射源信息发送到地表的范围示意图

真正决定成像质量的是如图 2 所示：在排列片滚动后，最终对于地下每一个绕射源信息成像时，只要在地面两个菲涅耳带里采集的信息足够充分及分布均匀，不管宽方位角采集或窄方位角采集，收敛聚焦后，都能正确成像。

图 3～图 9 为我用最简单的成像理论证明的图件。

理论证明，对于地下非各向异性地层，当地下只有一个绕射源的情况下，采用宽、窄方位两种采集方式最后的成像结果是基本一致的。

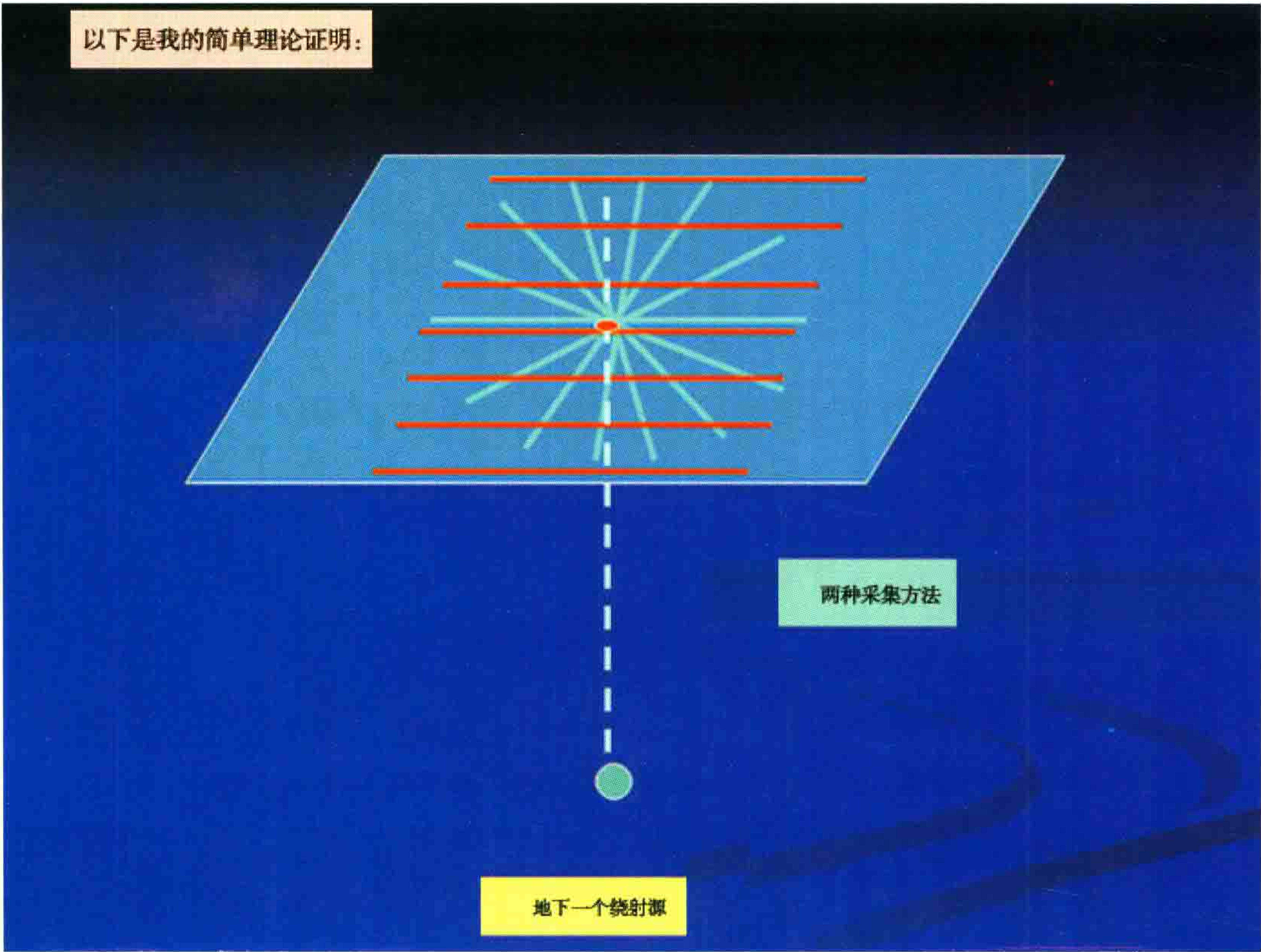


图 3　宽窄方位两种采集方法示意图

图中天蓝色为宽方位采集，红线为极端的窄方位采集。

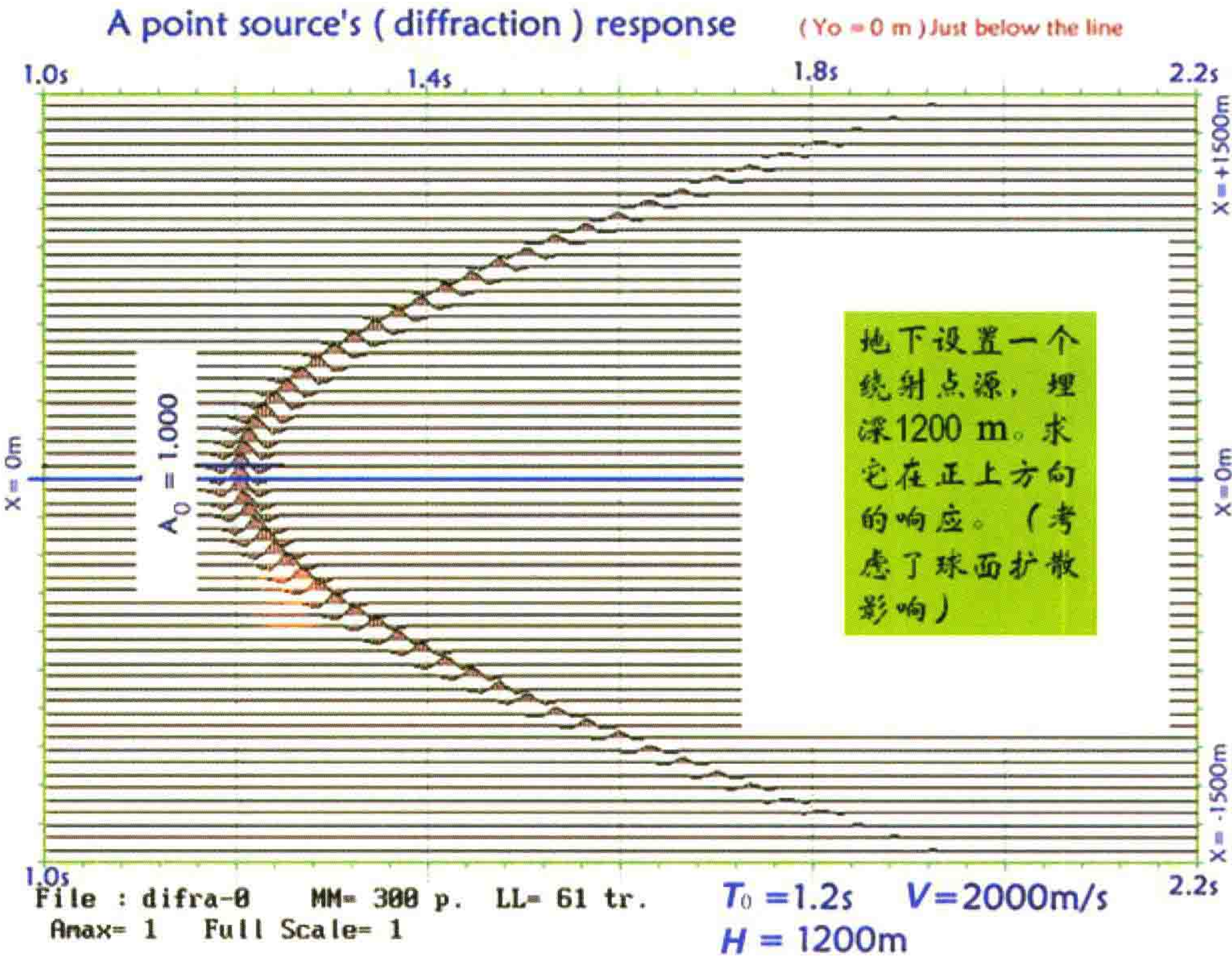


图 4　绕射点源在正上方地表获得的响应

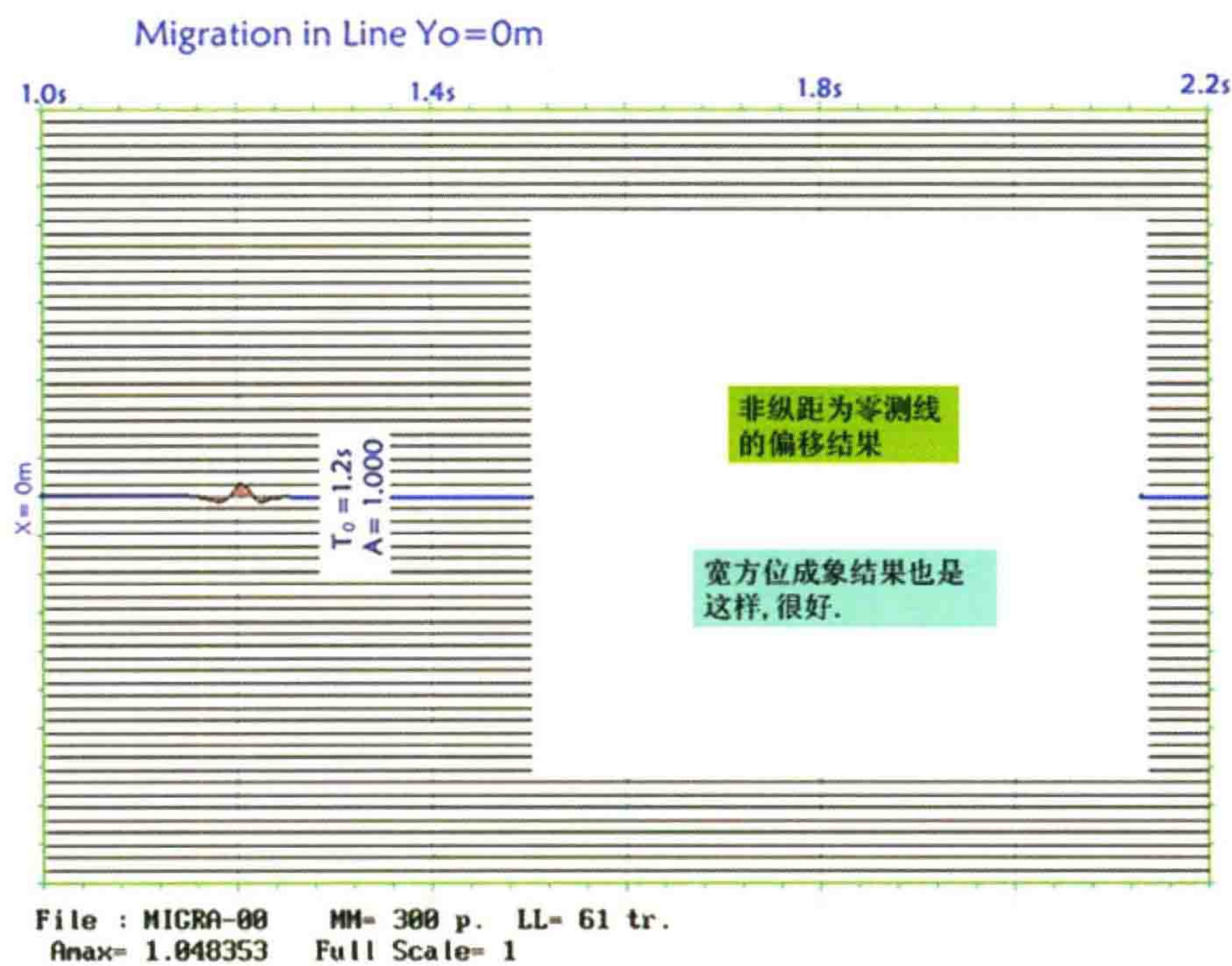


图 5 非纵距为零测线的偏移结果

如果我们采用宽方位采集，那么图 4 便是每个方向上的地震响应，图 5 便是宽方位成像的结果，准确成像在 $T_0=1.2$ s 处。

假定我们用窄方位采集，在地面用 1 条线接收，滚动 7 次，这是彻底的窄方位了，如图 3 红色线条。于是对地下同一个绕射源来说，就是相当于有 7 个非纵距的测线接收到了信息。7 条线的信息就如图 6 所示(其中有 3 条是重合的)。

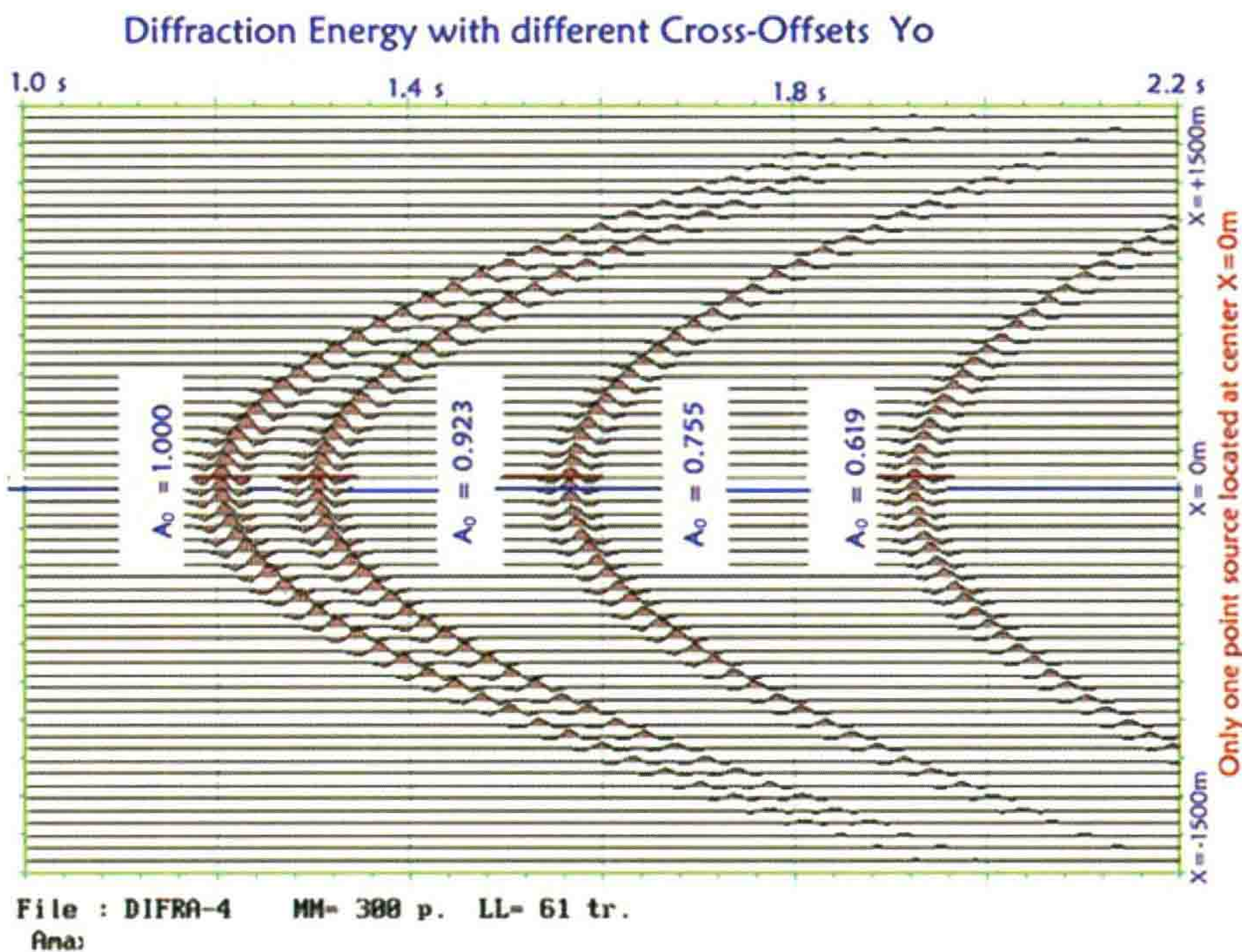


图 6 7 条线，非纵距非别为 0 m、500 m、1000 m、1500 m 的绕射响应

现在我们把 7 条测线的双曲线在各自 x 方向剖面里作偏移归位。得到如图 7 的 7 个 y 聚焦点。画到 y 方向里就如图 8 所示。

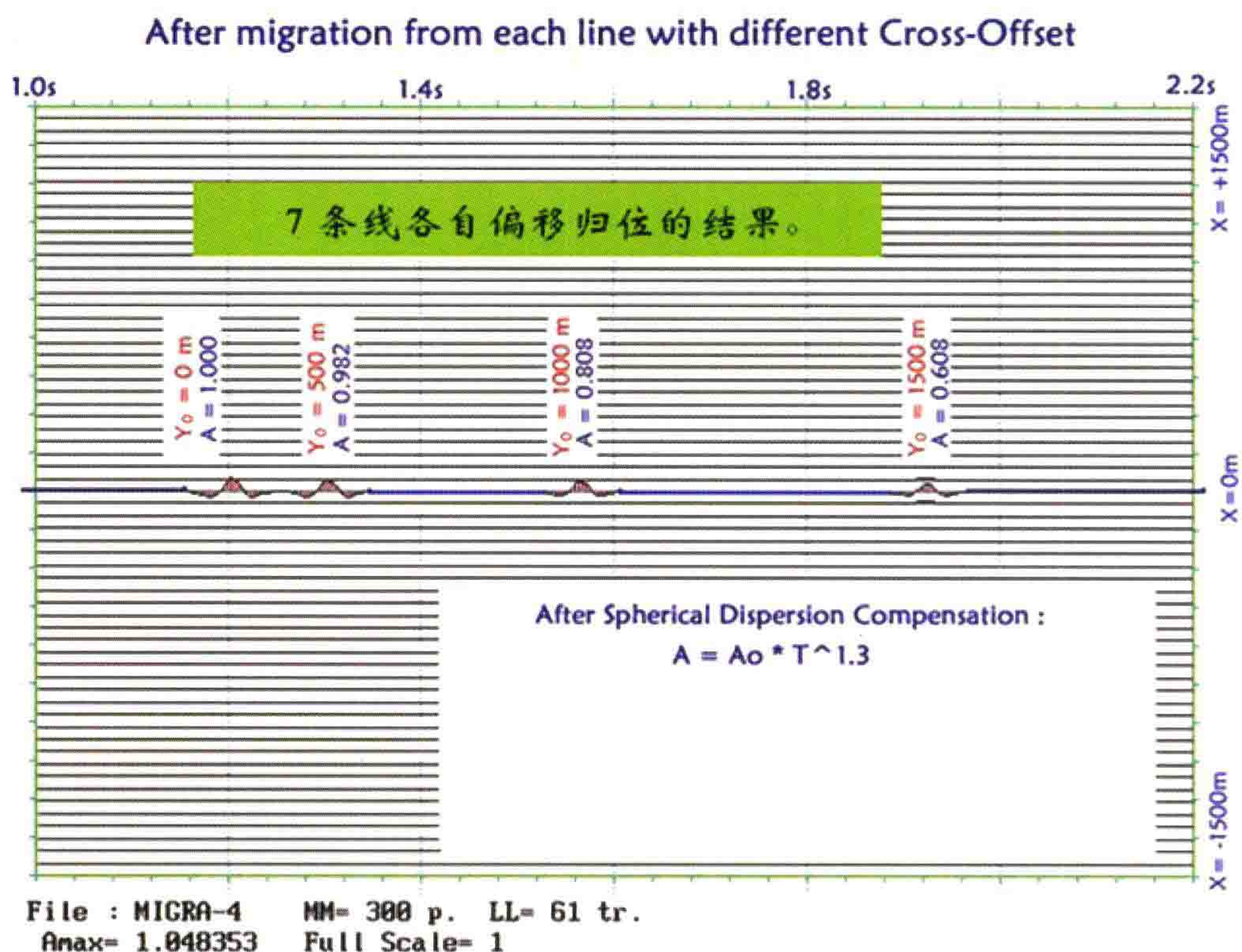


图 7 7 条线沿 x 方向偏移归位的结果（y 轴上的投影）

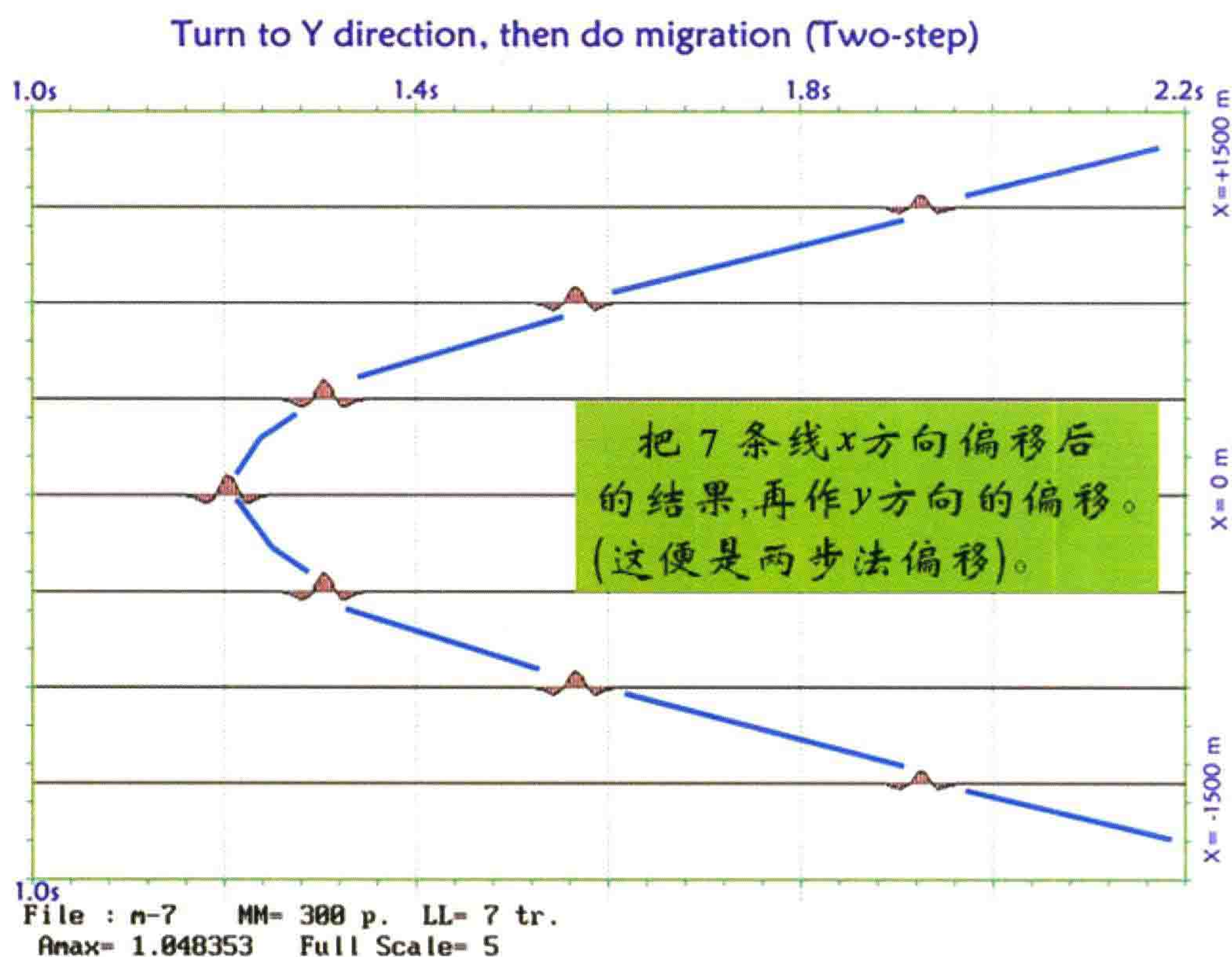


图 8 把七条线 x 方向偏移后再做 y 方向偏移

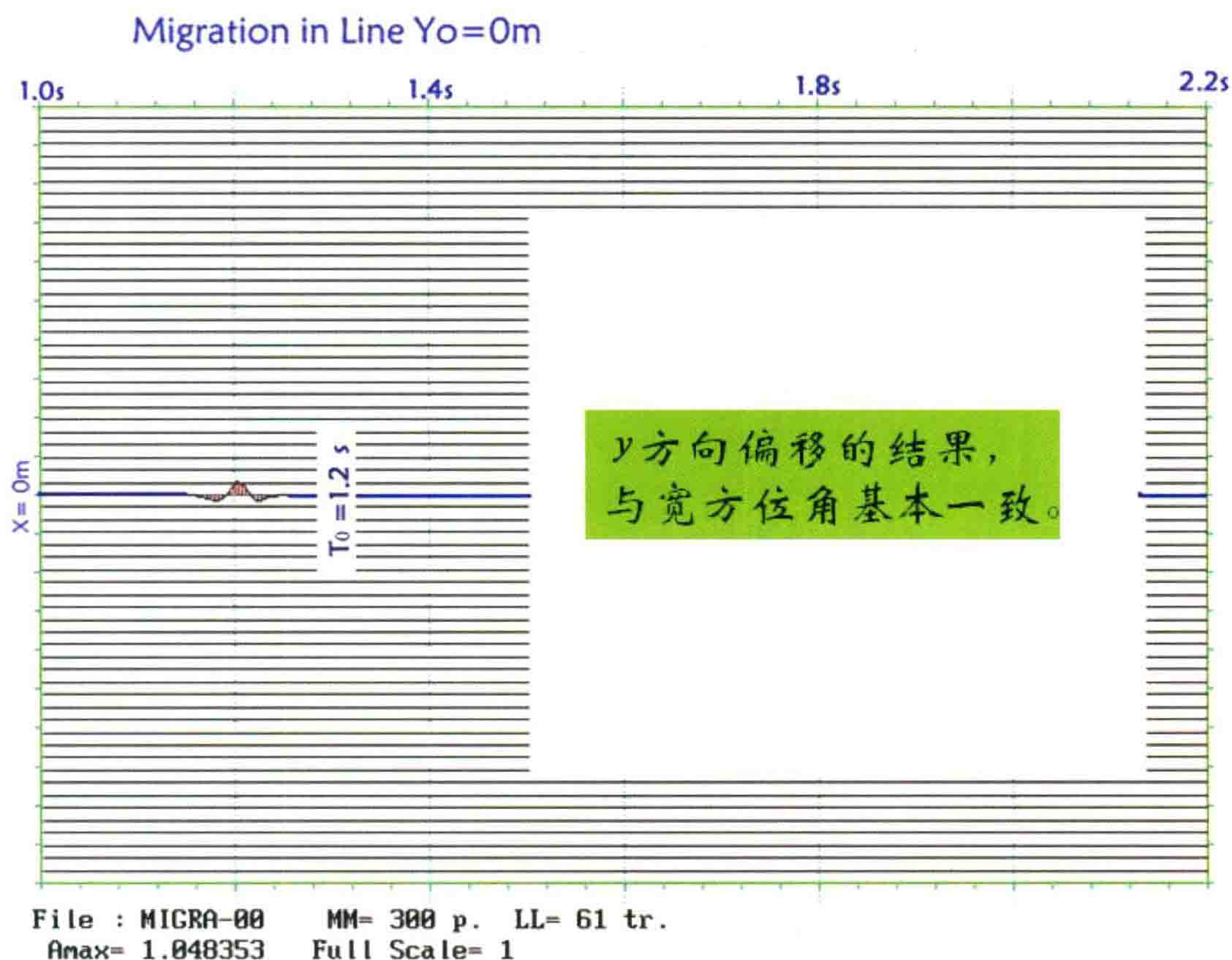


图 9 y 方向再偏移的结果

再把 y 方向做一次偏移归位，就得到如图 9。绕射源也正确成像于 $T_0=1.2$ s 处，与宽方位成像完全相当。这便是两步法偏移的结果。

地下来的信息是由无数个绕射源所组成。以上的理论证明也就说明：在各向同性的介质里，采用宽、窄方位两种采集方式最后的成像结果是基本一致的。

二、中国石油大学（北京）水槽物理模型的试验结果

为了进一步用理论模型来证明问题，我曾建议由中国石油大学（北京）用水槽物理模型来做试验，试验已经有了结果。

下面内容选自中国石油大学的水槽物理模型试验报告，**这是一篇中国石油大学（北京）中国石油天然气集团公司物探重点实验室狄帮让教授等人的文章——《宽/窄方位三维观测系统对地震成像的影响分析——基于地震物理模拟的采集方法研究》，发表于《石油地球物理勘探》杂志 2007 年第 1 期。他们通过地震物理模拟的采集方法，研究结果指出：在没有各向异性的条件下，宽方位和窄方位三维采集都能对地下目标实现基本正确的地震成像，而且两者的成像分辨率基本相当。**

宽/窄方位三维观测系统对地震成像的影响（一）

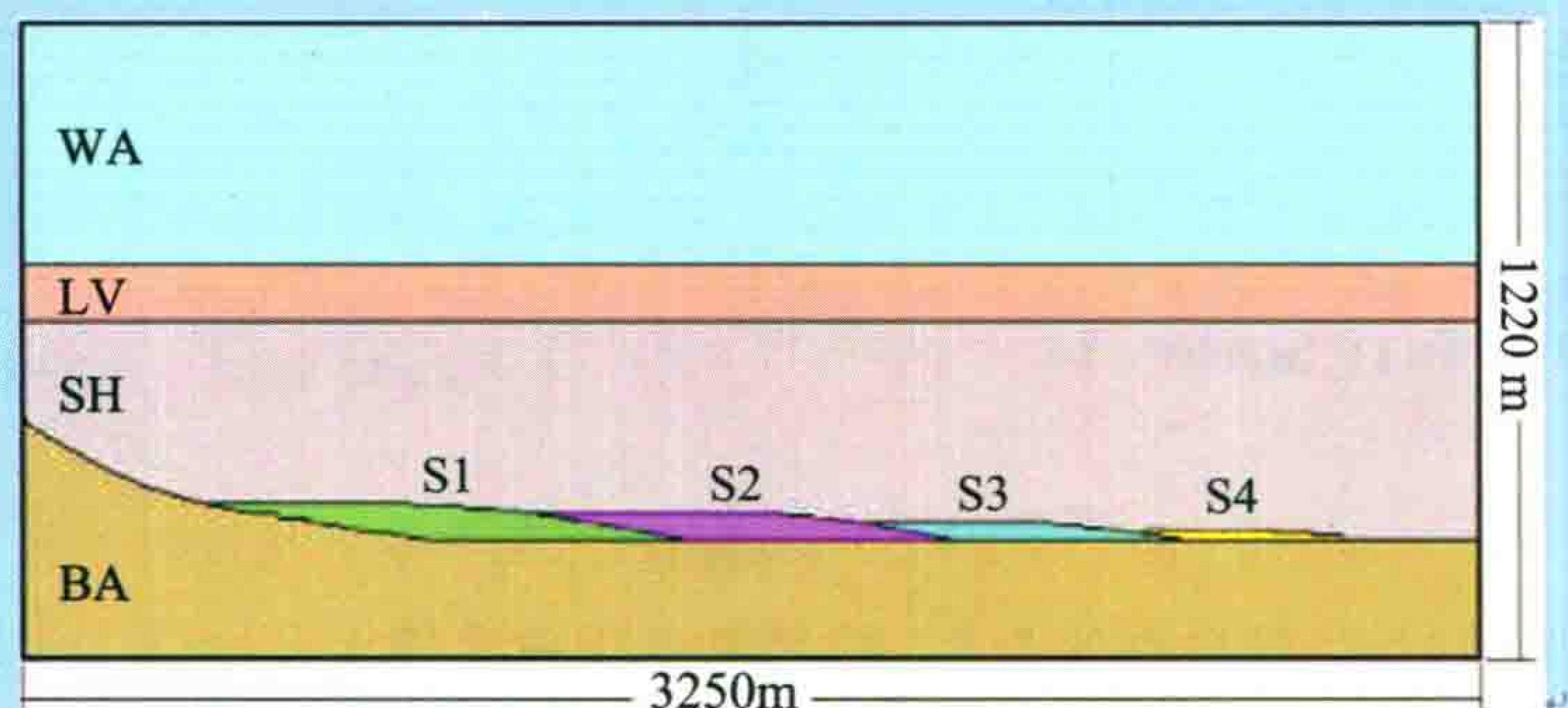
—基于地震物理模拟的采集方法研究

狄帮让 孙作兴 顾培成 魏建新 徐秀仓

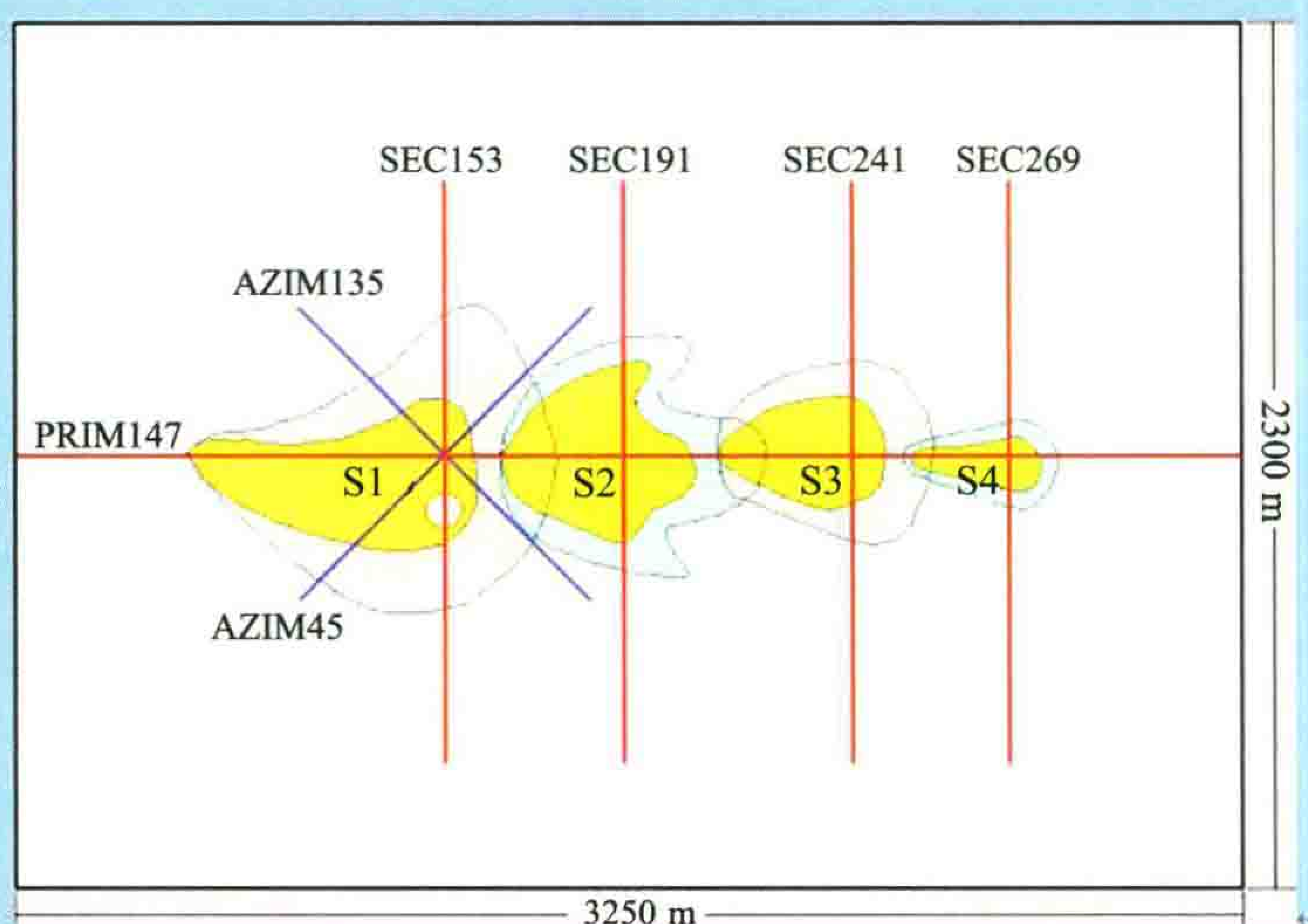
（中国石油大学CNPC物探重点实验室）

通过对三维偏移数据体的时间切片的宏观全局分析和偏移剖面的微观局部分析，得出如下结论：在上覆地层相对平缓、速度横向变化不大的地质背景下，以及采用CMP叠加偏移处理的前提下，宽方位和窄方位三维采集都能对地下目标实现基本正确的地震成像，而且两者的成像分辨率基本相当。

图 10 中国石油大学（北京）物理模型试验研究报告



（a）穿过模型中轴线的垂直切片图



（b）4个扇体的水平透视图及7条扇体成像分辨率分析线

图 11 试验所建 4 个砂体的物理模型示意图

水槽试验所采用的观测系统数据如下。

全方位三维观测系统 16 线 4 炮/2×32 道/8×8 次正交型束状观测系统：纵向道距 25 m，滚动距离 100 m，滚动 29 个模板；横向线间距 100 m，炮点距 25 m，滚动 1 线 100 m，共计 17 束线，约 1800 炮。地面

观测面积为 4000 m×2100 m =8.4 km^2，地下资料覆盖面积为 6.1 km^2。

窄方位三维观测系统 6 线 4 炮/2×40 道/3×20 次正交型束状观测系统：纵向道距 25 m，滚动距离 50 m，滚动 56 个模板；横向线间距 100 m，炮点距 25 m，滚动 1 线 100 m，共计 17 束线，3800 多炮。地面观测面积为 4300 m×2100 m=9 km^2，地下资料覆盖面积为 6.2 km^2。

两种观测系统的横纵比：全方位的指数为窄方位的 4.57 倍。

两种观测系统的三维数据采集均超过 180 万道模拟地震记录，采集时间均为 7 d。三维资料处理采用常规的先叠加后偏移流程，采样率为 1 ms，处理成果为两个三维偏移数据体。

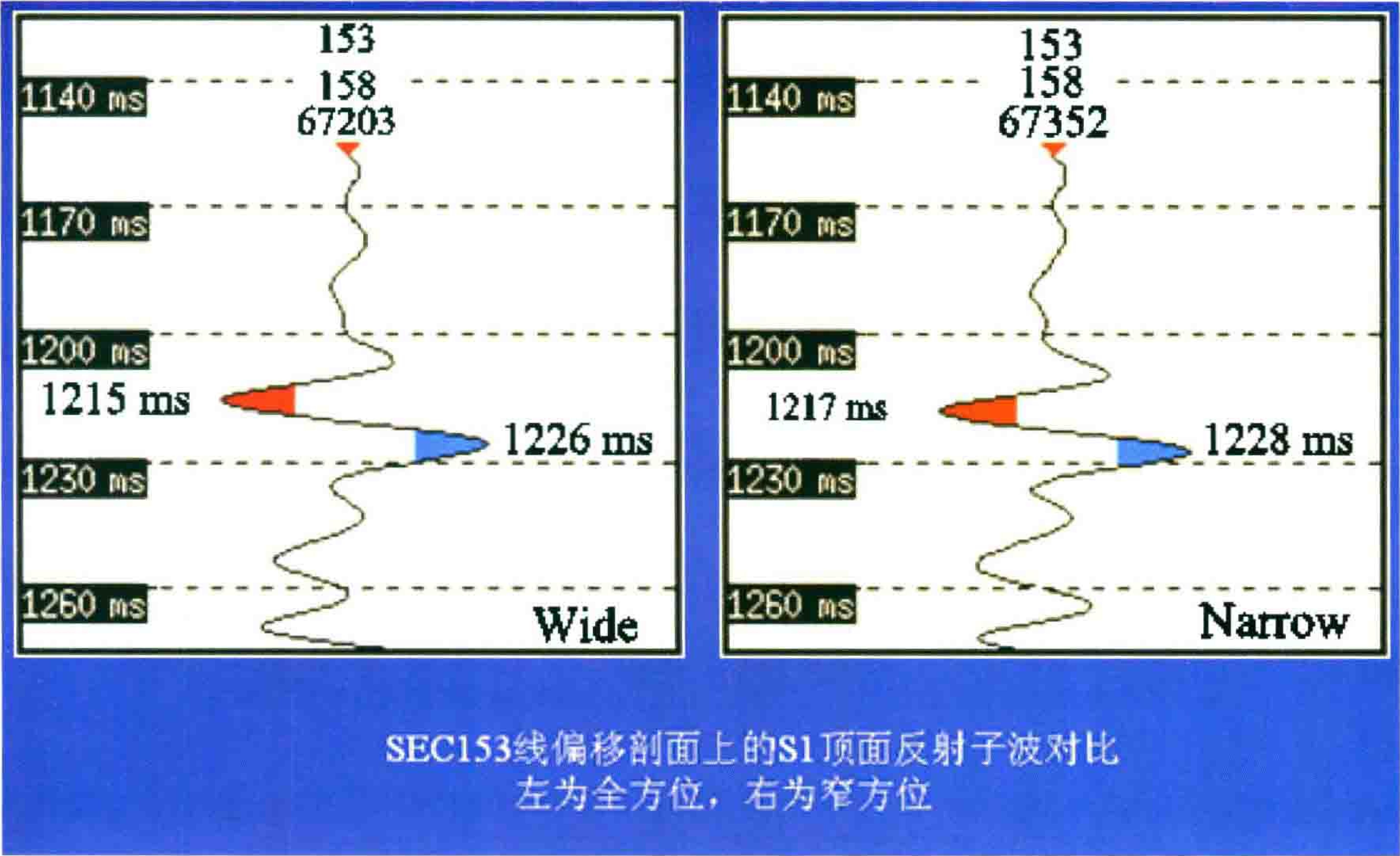


图 12 中国石油大学(北京)试验报告中的反射子波对比图件(报告中的图 3)

实验室三维数据采集先采全方位，后采窄方位，延续时间长达 14 d，因实验环境有微小变化及观测系统不同等原因，导致两种偏移数据体的地震反射子波略有差异。图 12(原文为图 3)是从扇体 S1 顶面反射同相轴上提取出来的混合相位子波，说明两种时间剖面的同相轴错动 2 ms；但视周期均为 22 ms，说明反射波视主频相同，均为 44.5 Hz。

有了宽方位及窄方位这 2 个数据体后，按照宽、窄方位的采集参数，用计算机作三维成像处理。结果如下。

图 13 为不同方位角成像结果的切片对比图件，从切片来看，可以看出宽、窄方位角三维数据采集所获得的结果基本相当。

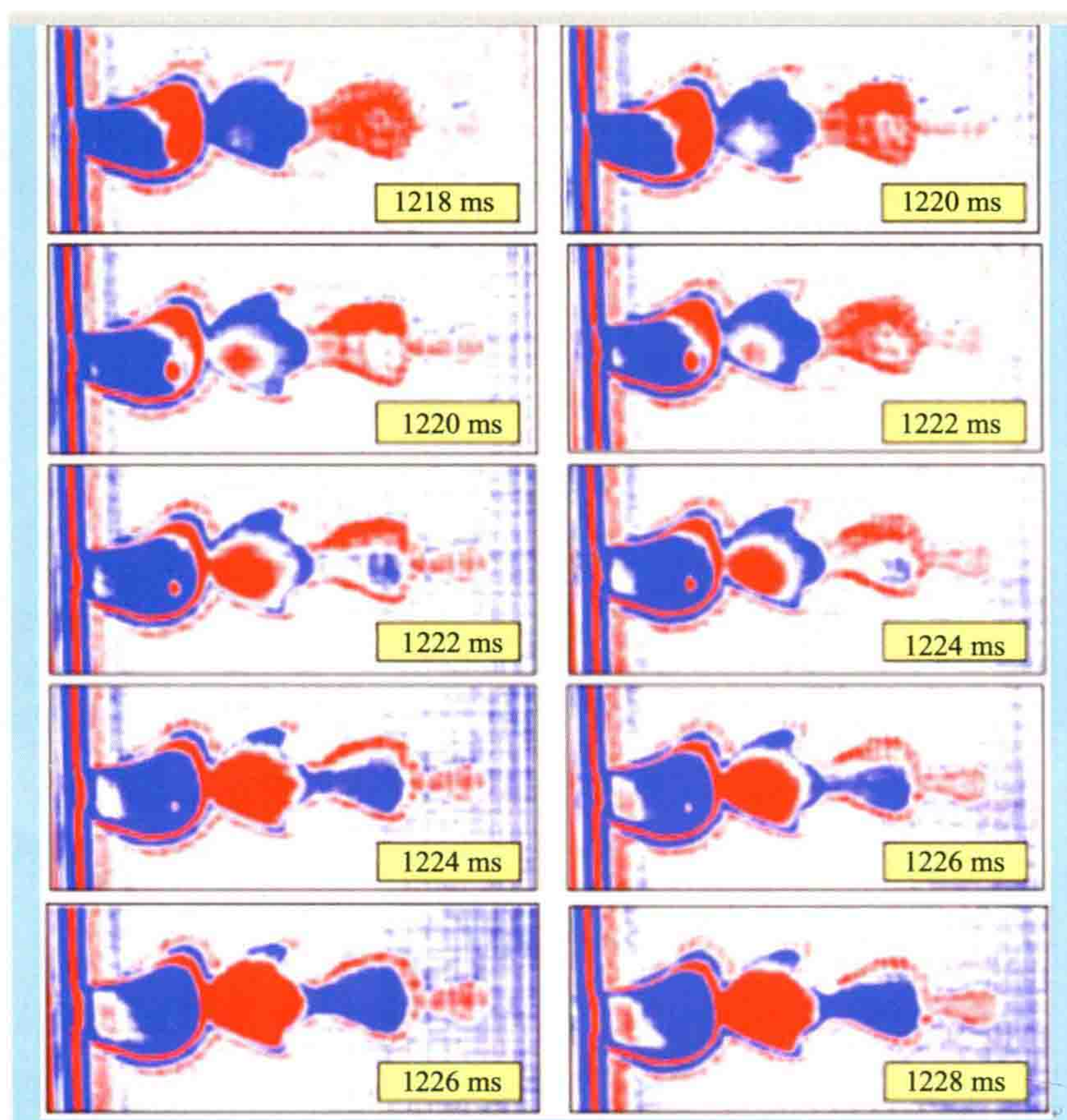


图 13 成像结果切片对比图件(左为宽方位,右为窄方位)

图 14、图 15 为偏移剖面对比图件,从结果可以看出,二者的分辨率基本相当。

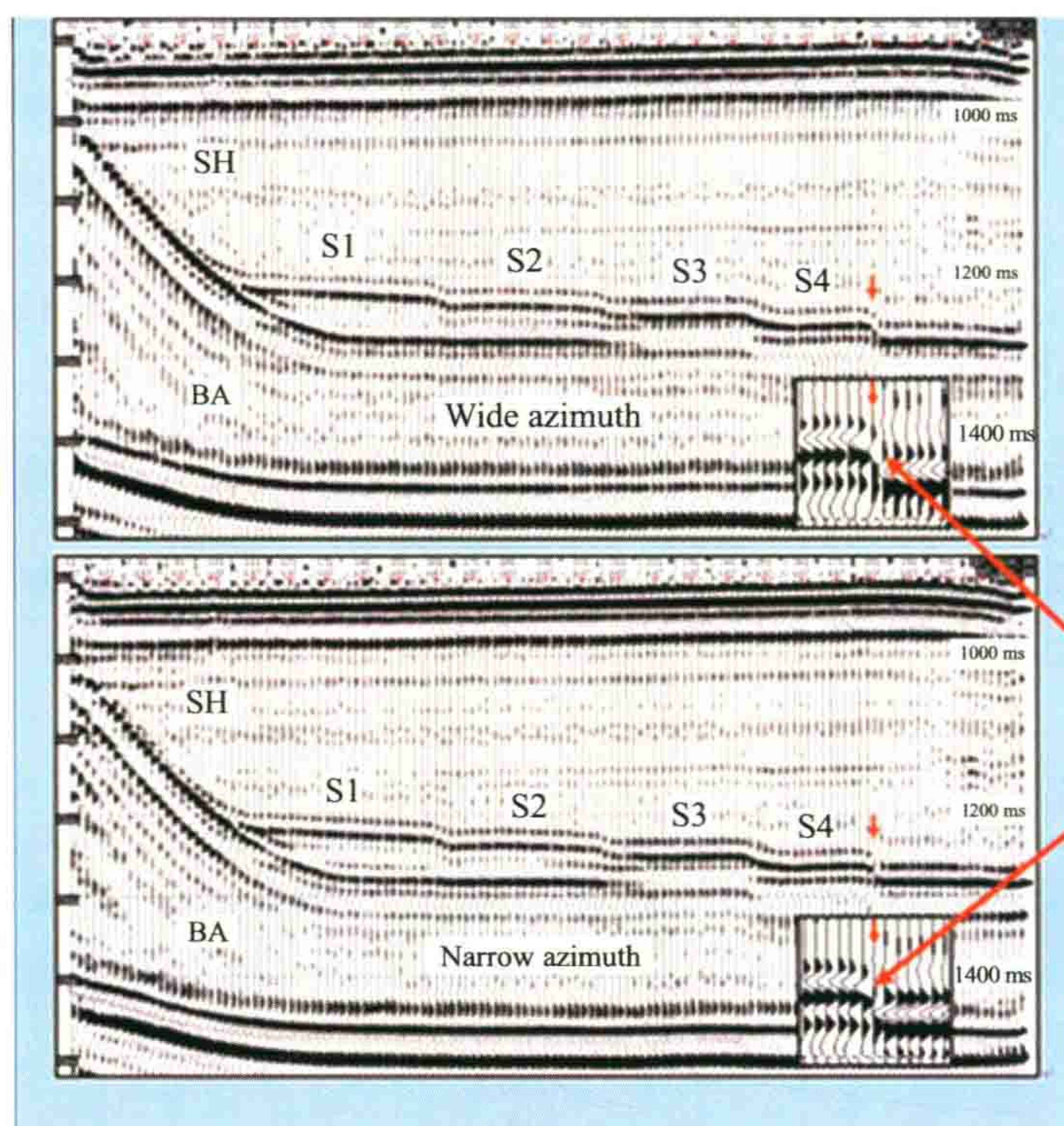


图 14 偏移剖面对比(上为宽方位,下为窄方位,分辨率基本相当)

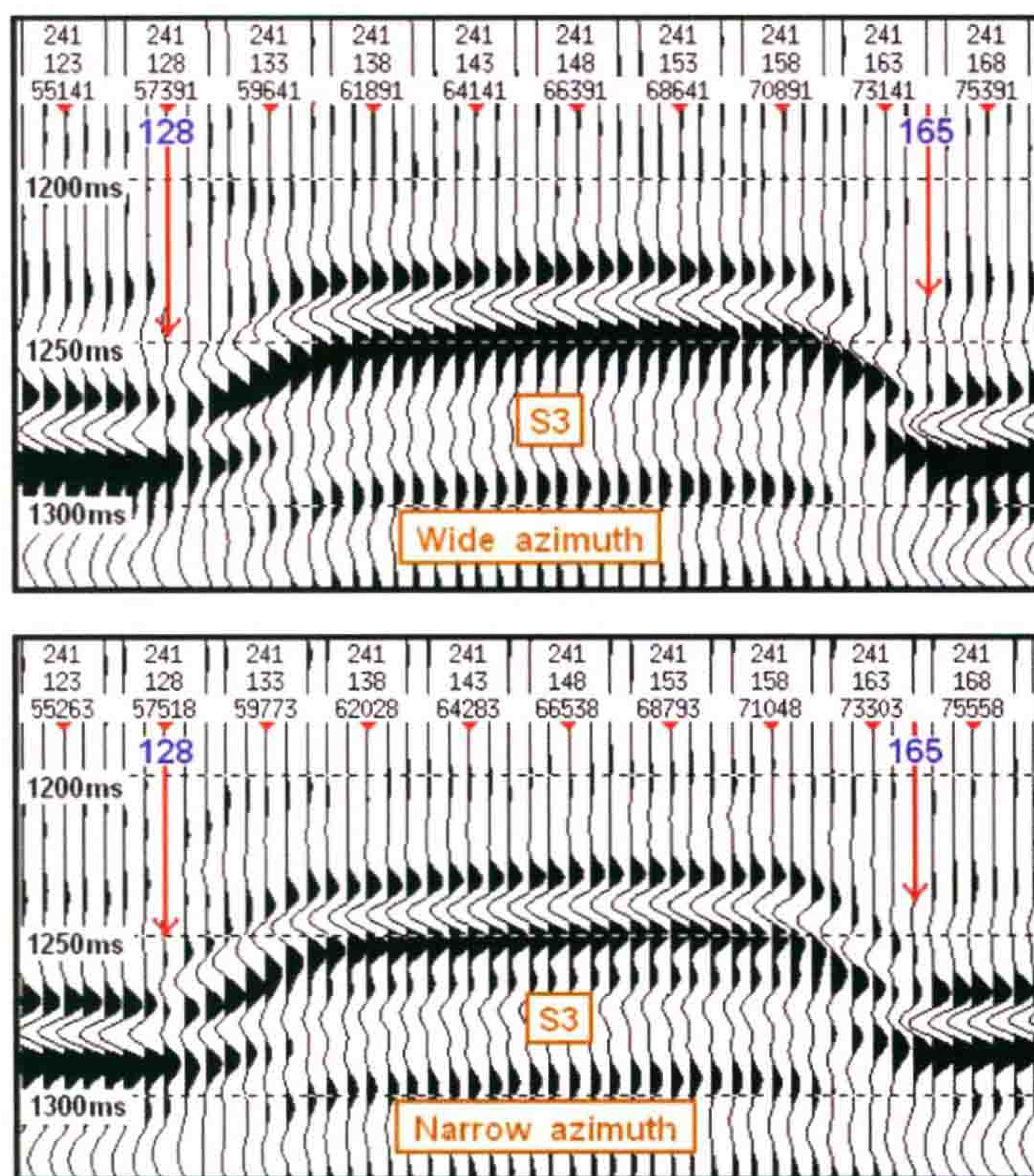


图 15 成像部分偏移剖面对比(上为宽方位,下为窄方位,分辨率基本相当)

该文的结论:理论预测薄扇体的最佳偏移归位精度为 2 个 CMP 道(RFh=24 m),实验检测的最大误差为 2CMP 道。定量对比结果表明:宽、窄两种观测系统都能使四个薄扇体正确成像,而且两者的成像分辨率基本相当。

以上证明,如果地下没有各向异性,如果没有动、静校正的误差以及信噪比相当高,那么只要地下两个菲涅尔带范围内有足够的采样,无论宽、窄两种观测系统都能正确成像,而且两者的成像分辨率基本相当。

我同意在通常情况下,宽方位和高密度采集都是对成像有一定的好处,主要体现在空间采样的完整与覆盖次数的提高,它没有什么坏处,只是从经济角度考虑,宽方位和高密度都要付出更大的生产成本。但是在我国西部低信噪比地区,尤其在我国西部山区,我不赞成作宽方位采集,因为这会带来很多问题。

三、建议

我们应该针对不同的地区根据实际条件决定我们的施工方案。

在我国东部的平原地区,你采用宽窄方位采集都可以。如果地震仪器道数增加到 5000~10000 道,宽方位采集还能提高工效。但是仪器的租赁费用及折旧费用往往高达采集成本的 30%~50%。(10000 道的地震仪器,仅租用 3 个月需缴纳人民币 1800 万元的租金,还不算检波器及小线的费用。)宽方位采集往往需要用 1 倍多的地震仪器道数,这就要从经济角度来作衡量。

我国西部平原区如果采用可控震源施工,激发点位就可以成倍地增加,也有利于采用宽方位高效施工。但是缺点是可控震源在地表振动,能量小,干扰大,较难获得高分辨率剖面。而且必须采用极高的炮道密度,才能得到能用的剖面。2011 年,可控震源在克拉玛依施工的资料就品质不高,值得我们吸取经验教训。

最近国外在陆地上普遍盛行使用可控震源施工,它的特点是高效与低价。尤其是近年来交替扫描、滑

动扫描、HPVA 及采用 ISSN 震源独立扫描节点连续接收等新技术后，工效大大提高，成本低廉。更是被人青睐。

结合近年来，低频可控震源的推出，便有了“两宽一高”，即宽频带，宽方位，高密度的可控震源采集方式，以为是今后的发展方向。最近，新疆油田在准格尔东部沙漠里使用了“两宽一高”技术，资料有所改进。他们的炮道密度已经高达每平方千米 200 万～300 万道。我认为沙漠里地下并不存在各向异性，为什么是宽方位起的作用呢？最可能还是比平时密度高 10 多倍的 200 万～300 万道/平方千米的高密度高次覆盖在起作用。

记得有这么一个“狐假虎威”的故事。狐狸碰到老虎，老虎要吃它。狐狸说：“且慢，不要吃我。我是这片林子的大王。”老虎不信。狐狸说：“不信你跟着我去看看”。于是他们在林中一起走，所到之处，小动物都吓得四处逃窜。老虎信了。所以，“两宽一高”技术里宽方位到底起多大作用，我们应该实事求是作分析。

宽方位采集的另一个目的是求取地下的各向异性参数。从我国西部几个实例看来，目前不同方位角成像的差别恐怕主要是由于划分方位后，覆盖次数不够高，信噪比很低而发生的图形差别。

我在本书的文章编号 102《低信噪比地震资料的基本概念和质量改进方向》及 206-2《速度谱解释中需要注意的几个问题》中就已指出：速度谱上的能量团极值点经常由于 6 种原因偏离正确数值。其中道集中的同相轴由于较强干扰波的存在，造成速度谱极值点的左右摆动，这是最常见的。于是直接从速度谱上的能量团中心读取速度值作叠加，你虽然可以使叠加振幅得到极大，但是，它对有效波是有伤害的。而且由于你的速度左右摆动，你还会误以为是存在速度各向异性。

如果我们忘记了这个事实，我们对地下的各向异性还会做出不合理的推论来！

不要盲目地跟着外国信噪比较高地区的成功例子来学宽方位，要根据实际情况做分析，得到自己的结论。

实事求是的精神对搞科研工作的人是最重要的。

文章编号 307



井间地震勘探的误区及出路



这是我和我的博士生王建花发表于 2004 年的文章。

本文用井间地震的成功与失败的几个实例,分析其原因。第一,认为井间地震在地下遇到反射界面时,入射角很容易到达或超过临界角。此时,激发能量很容易产生转换波及各种横波。文章通过波动方程理论计算,从激发波场的快照说明,在左右两侧会产生两个波场的混乱“牛角尖”区,而通常的井间地震的研究目标刚好在此混乱区。第二,井间地震目前的成像方法一般是 VSP-CDP 法,它基本是射线的方法,效果不佳。英国伦敦皇家学院尝试了用各向异性的层析反演方法,在两口井相距 25 m 的情况下,也没有得到很好的效果。只要地层中夹有灰岩、油页岩等高速层,就很难准确成像。

列举的井间成功的例子都是保持入射角很小,射线近乎直上直下。此时,波场是简单的纵波波场,才取得好效果。

作者最后指出井间地震的出路及改进方向。

此文 2004 年 2 月发表于《石油地球物理勘探》第 1 期,作者李庆忠、王建花。

摘 要

井间地震勘探的目的是获得主频和分辨率都很高的地下记录。然而,目前的井间地震勘探陷进了一个误区,即井间地震勘探的大部分射线都落在临界角以外的区域。本文通过对一些实例的分析,确信井间地震勘探的射线入射角小于或大于临界角是成功或失败的标志。文中采用弹性波波动方程正演模型论证,当地层水平时,在井下激发,地震波场在左、右两侧很快超过了临界角,形成极为复杂的波场紊乱区(笔者称之为“牛角尖”)。在这个区域内,射线理论已经不再适用,初至也无法准确拾取,造成了井间成像的极大困难。据此,文中明确指出了今后发展井间地震勘探工作的出路在于将射线的入射角控制在临界角以内,并保证震源有足够的能量。

关键词

井间地震　入射角　临界角　佐布利兹方程　弹性波动方程

前言

目前我国大部分地震勘探区域已进入油田开发阶段,常规勘探已不能满足要求,需要做一些更精确的勘探才能加深对地下复杂地质结构的了解。尤其是要求地震勘探解决油田开发中的一些问题。应该说井间地震勘探是可以做好这项工作的,因为它能获得主频和分辨率都很高的地下记录,对这些记录进行反

演，即可明确两井间的地下情况。

目前国内外很多公司在许多地区都做过井间地震工作，其中大部分工作尚处于探索阶段。究其原因，笔者认为是目前的井间地震勘探工作陷进了误区，即井间地震勘探中有效观测区大部分射线的入射角都落在大于临界角的区域。笔者将此区域称为“牛角尖”区域。

本文通过对多个井间地震勘探失败和成功实例的分析，确信失败的例子都与射线落入“牛角尖”区域有关。成功的例子说明射线未落入“牛角尖”区域，笔者将此区域称为“波形简单区”。据此，笔者认为今后井间地震勘探的出路在于设计井间地震观测系统时，应当力求将射线的入射角控制在临界角以内。

一、井间地震勘探不理想的实例

（一）实例一 ——荷兰井间地震勘探实例

图1展示了荷兰的一个井间地震勘探实例。其中图1(a)为利用初至波层析走时反演所做的解释剖面，接收井段为2236～2603 m，每隔3 m设一个接收点，炮点深度为2350 m。图1(b)是图1(a)中接收井段所得到的共炮点记录，该记录的主频达1000 Hz以上，其炮检距分布情况如图1(c)所示。在该例中，井间地震记录[图1(b)]的主频很高，但其续至波的性质极为复杂，除了几个上行反射波以外，难以认清其性质。岩盐与硬石膏的速度高达4500～6000 m/s，许多射线的入射角都接近或超过临界角，很难进行解释，只能利用其初至作走时CT拟合。其解释剖面中没有明确盐丘的情况，两井之间地层分布用直线相连，表明200～300 m的地质情况仍然解释不清。图中的断层为假想的断层，没有太多的根据。因此人们很难对该例中的地下地质情况有一个清楚的认识。

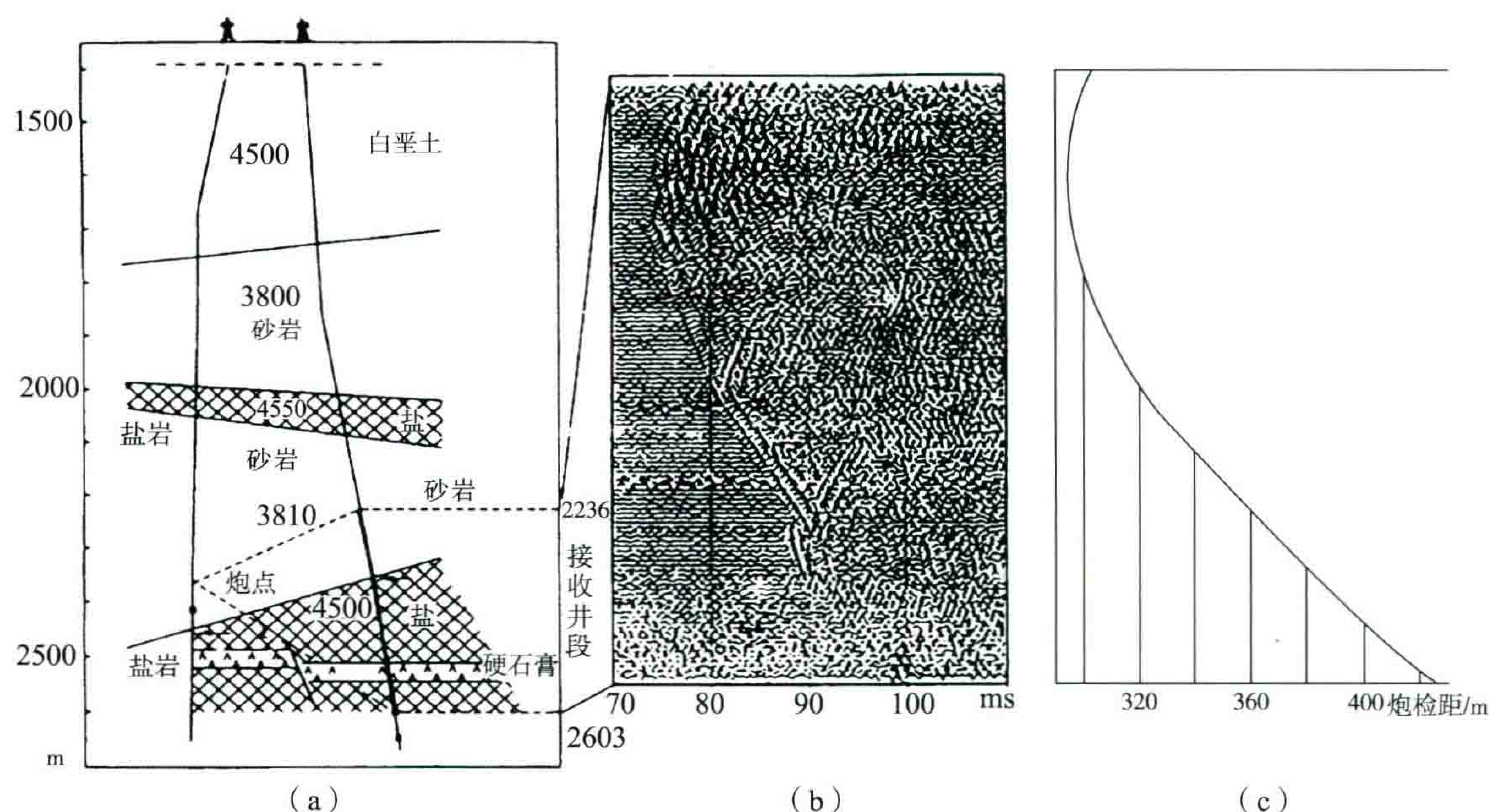


图1 荷兰的井间地震试验

(a) 利用初至波层析走时反演所做的解释剖面，图中的数字为地层的速度(m/s)；
(b) 图1a中接收井段得到的共炮点记录；(c) 各道炮检距分布

（二）实例二 ——休斯敦大学的浅层未固结储层中的井间成像

该例(休斯敦大学联合地球物理实验室)是在浅层未固结储层中的井间成像[1]。两井相距96 m，共65个炮点、53个水听器。该试验在非线性层析反演迭代过程中对目标速度作了约束。图2(a)—图2(c)分别

是做了1、2、3、4和5次迭代后的结果。在速度变化平滑且幅度较小的情况下，经过5次迭代后的最终层析成像结果基本上反映了该区速度随深度增加的趋势。

图3是声波速度曲线和层析反演的平均速度曲线的对比。由图3可见，两条曲线间误差较大，表明该层析反演的结果不理想。

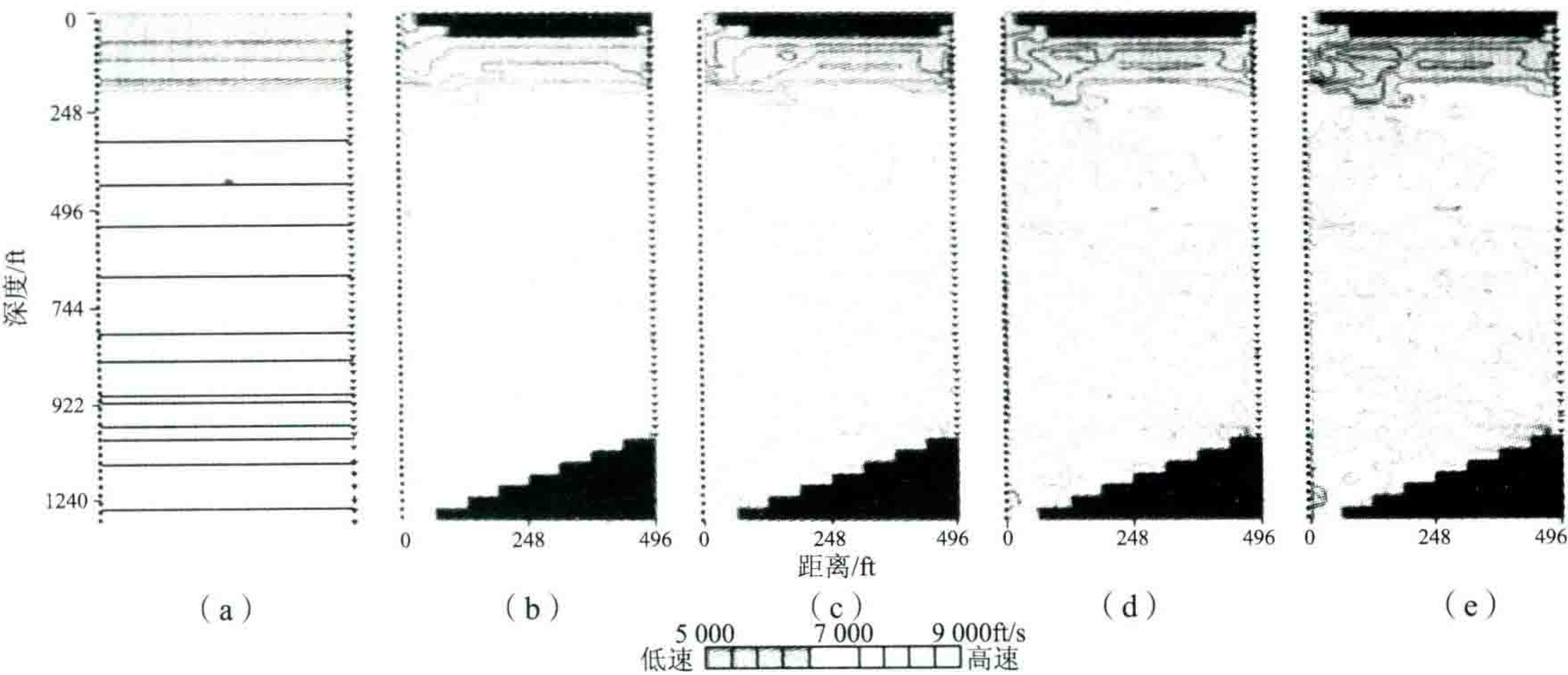


图2　带约束条件的非线性层析反演

(a) 1次迭代；(b) 2次迭代；(c) 3次迭代；(d) 4次迭代；(e) 5次迭代

每幅图左侧小圆点代表炮点，右侧的小三角形代表接收点，黑色部分代表射线不完全覆盖区域

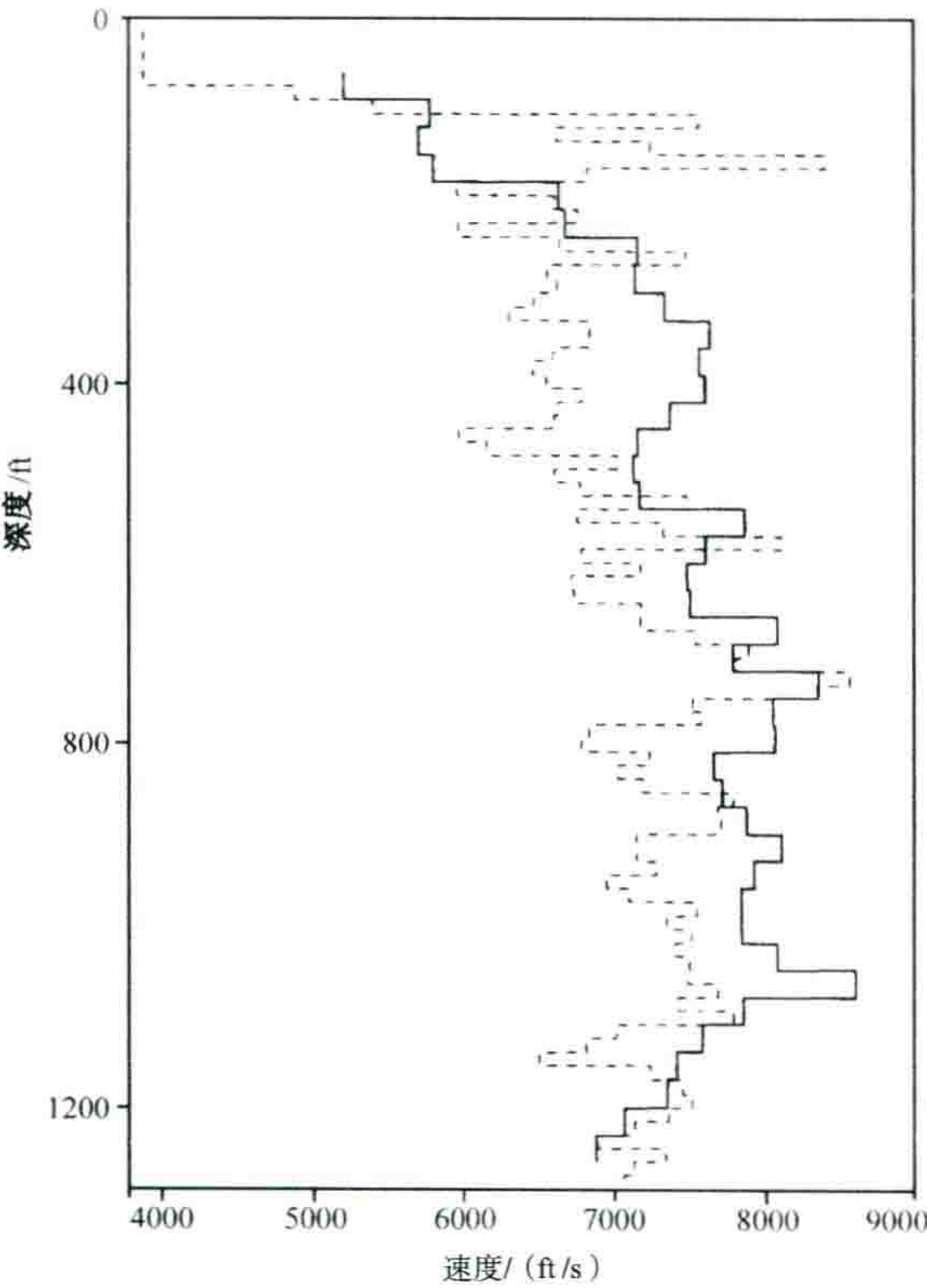


图3　声波速度曲线和层析反演速度曲线的对比

虚线为15 ft间隔的声波速度曲线；实线为层析反演后的小层平均速度

（三）实例三 ——罗家地区的井间地震试验

图 4 是胜利油田和 Tomoseis 公司在罗家地区合作进行井间地震试验的施工设计图[2]，两井相距 294 m。该例中反射波入射角大部分在 45°～70°之间，基本都超过了临界角[图 4(d)]，使所得记录不太理想，不能用来进行正确的反演。

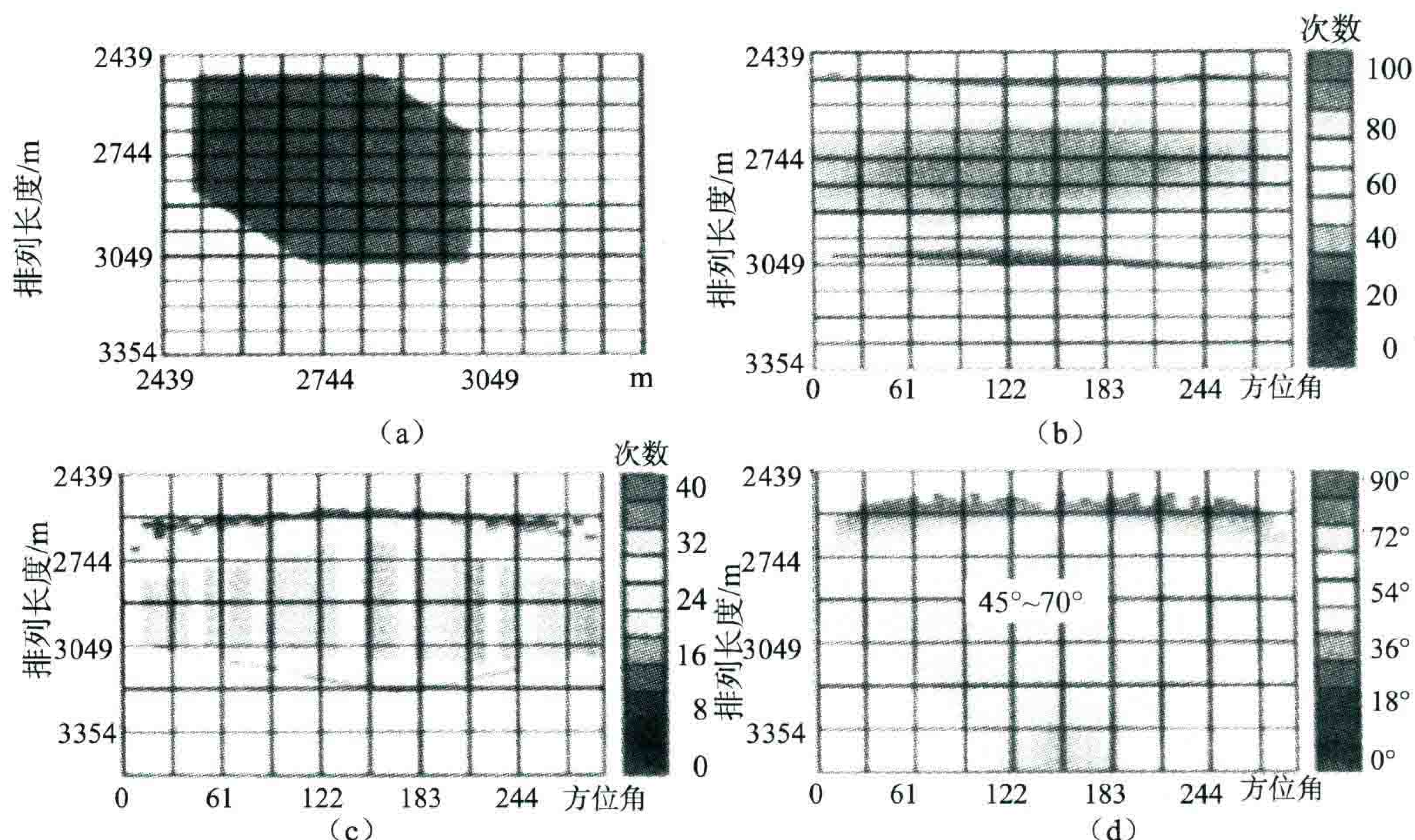


图 4 罗家地区井间地震施工设计图

(a) 观测系统图；(b) 射线覆盖次数分布；(c) 反射点叠加次数分布；(d) 反射波入射角变化

该例中用了 VSP-CDP 成像方法。VSP-CDP 成像方法是 VSP 和井间地震中经常采用的成像方法，只相当于共反射点道集的水平叠加，而不是波动方程偏移成像。

图 5(a)是普通的三维地震剖面，图 5(b)是用 VSP-CDP 成像方法得到的井间反射波成像剖面，文献[2]将该例作为成功的实例，但笔者对其有异议。虽然图 5(b)中剖面的主频比图 5(a)的主频高许多倍，但是很难说明井间地震反射剖面比普通三维地震剖面更可靠。例如图 5(b)中深度为 2900 m 左右的反射同相轴是很强的水平直线同相轴，如果这是正确的，则应该有一个连续的水平产状的强反射界面；而在图 5(a)的普通地震剖面上 2.3 s 处(方框内)反而为一个扭曲同相轴，并且两剖面的同相轴产状也无法对应，笔者认为普通三维地震剖面还不至于这么不可信。现在人们往往一看到主频高、分辨率高，就认为反演结果正确且精度较高，但实际情况并非如此。

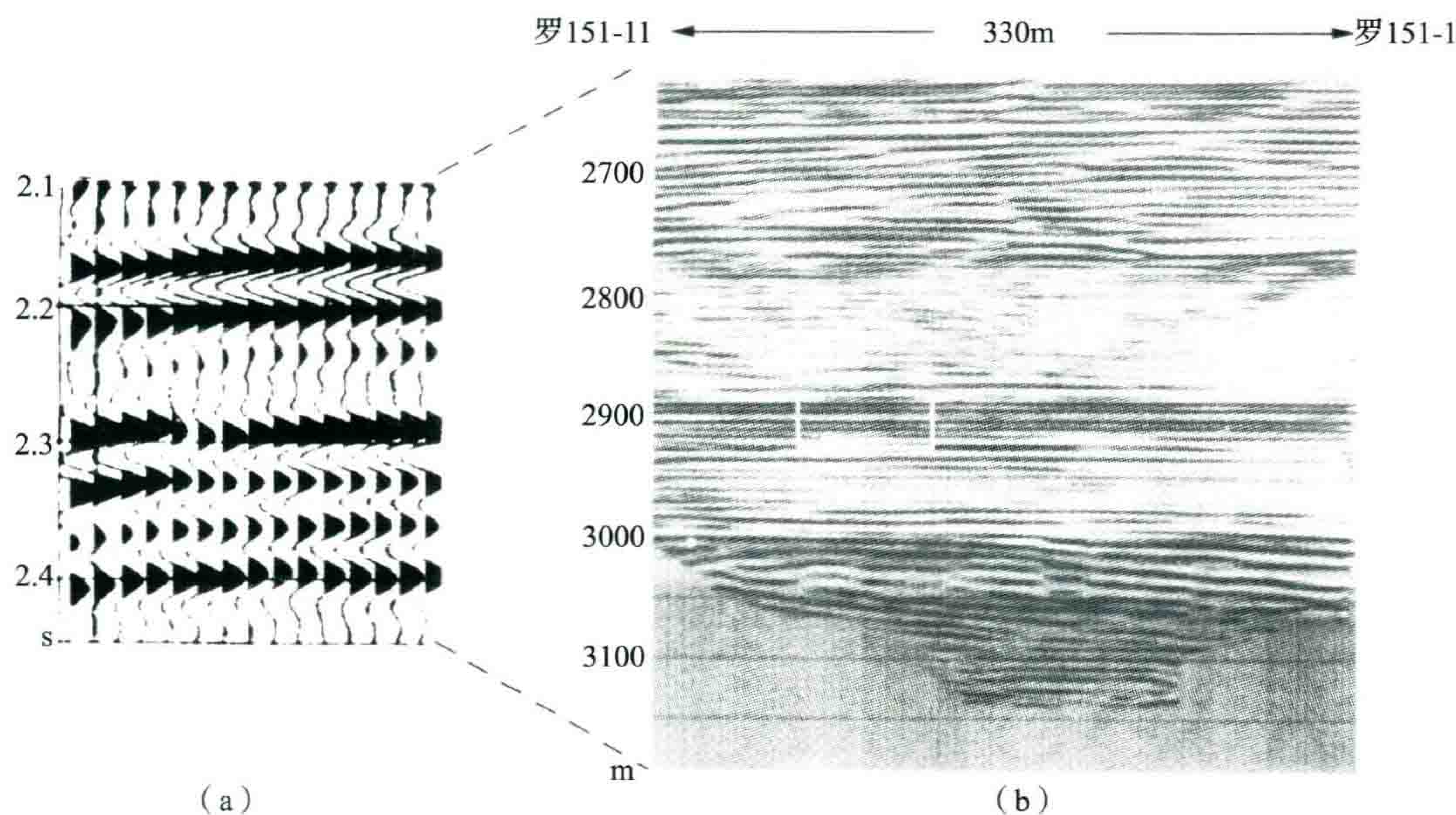


图 5 罗 151 井间反射剖面(b) 与过井三维地震剖面(a) 的对比

(四) 实例四 ——英国伦敦皇家学院的井间地震试验

该例是英国伦敦皇家学院做的一个较严格的各向异性介质的井间地震成像试验[3]，也是一个非常有意义的试验，它说明了相距非常近的两口井之间的井间地震反演成像的情况。相邻的两口井间距为25 m，对两口井都作了声波和岩性测量，如图 6 所示。两口井的声波曲线基本吻合，但还是有一定差别，其差值曲线见图 6 的中间部分。图 7 是该井间地震试验的共接收点道集记录，接收点深度固定在 110 m 处，炮点深度为 50～120 m，共 36 炮，每次移动 2 m。该记录中虽然初至起跳比较尖锐，主频达到 1000 Hz，但续至波非常复杂，很难进行解释。

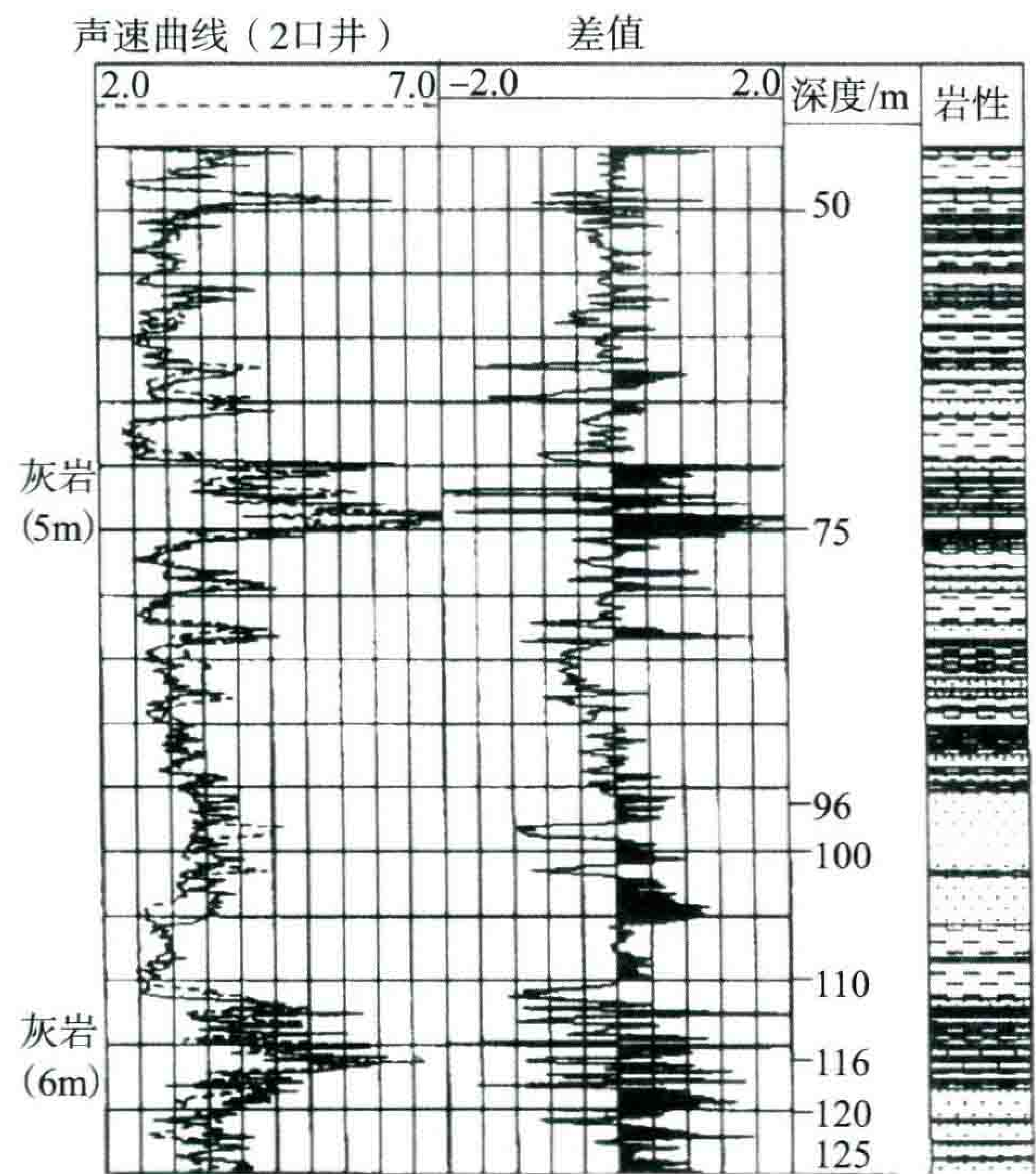


图 6 井 1、井 2 的声速测井曲线及其差值曲线[3]

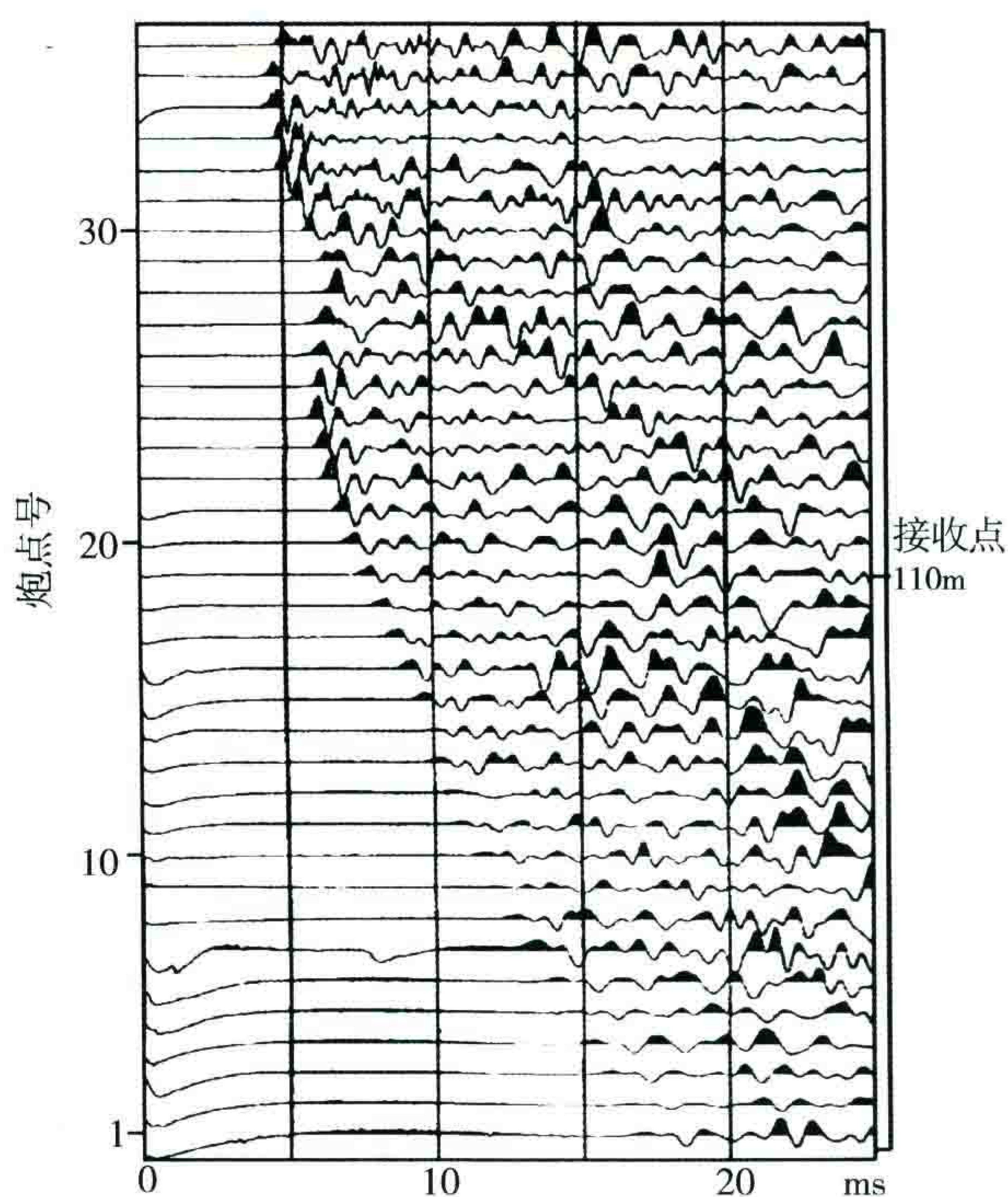


图 7 110 m 处的共接收点道集[3]

对弱弹性各向异性介质进行层析反演成像，需要求解 5 个参数的波场。我们假定各向异性较弱且符合“横向各向异性”的情况，用 Leon Thomson 方法把 5 个参数简化为 3 个参数。即 υ、δ、ε，然后求最小平方优化解。P 波速度随角度的变化可表示为：

$$\upsilon_P(\theta)=\upsilon_P(0)(1+\delta\sin^2\theta\cos^2\theta+\varepsilon\sin^4\theta) \tag{1}$$

$$\varepsilon=\frac{C_{11}-C_{33}}{2C_{33}} \tag{2}$$

$$\delta=\frac{(C_{13}+C_{33})^2-(C_{33}-C_{44})^2}{2C_{33}(C_{33}-C_{44})} \tag{3}$$

其中：υ 为速度；δ 和 ε 为各向异性参数；C_{ij} 为介质的弹性张量；θ 为波的传播方向与垂直轴的夹角。

为验证各向同性反演与各向异性反演的差别及使用约束条件的可行性，英国伦敦皇家学院做了以下试验。

图 8(a)和图 8(b)是用各向同性的方法进行层析反演的记录，其中图 8(a)是未加约束条件时反演得到的层析成像记录，图 8(b)是加了先验约束条件(速度为 2200～6700 m/s)，且进行横向平滑后反演得到的层析成像记录。前者的反演结果太粗糙，只能大致反映地层的水平层状特性和速度差；后者比前者有明显的改善，但大多数水平层仍不能在整个区域上连续追踪，中央的不少黑色条带的数值与井中真实的声波曲线[见图 8(f)]不吻合。此外在图 8(a)底部发现有速度值大于 10000 m/s 的介质(地下介质的速度不可能大于 10000 m/s，因为地幔的速度只有 8000 m/s)，很不合理，并且底部显示很乱，与图 8(f)所示的实测声速曲线相差太大。可见用各向同性的方法做初至波的层析反演得到的结果不合理。

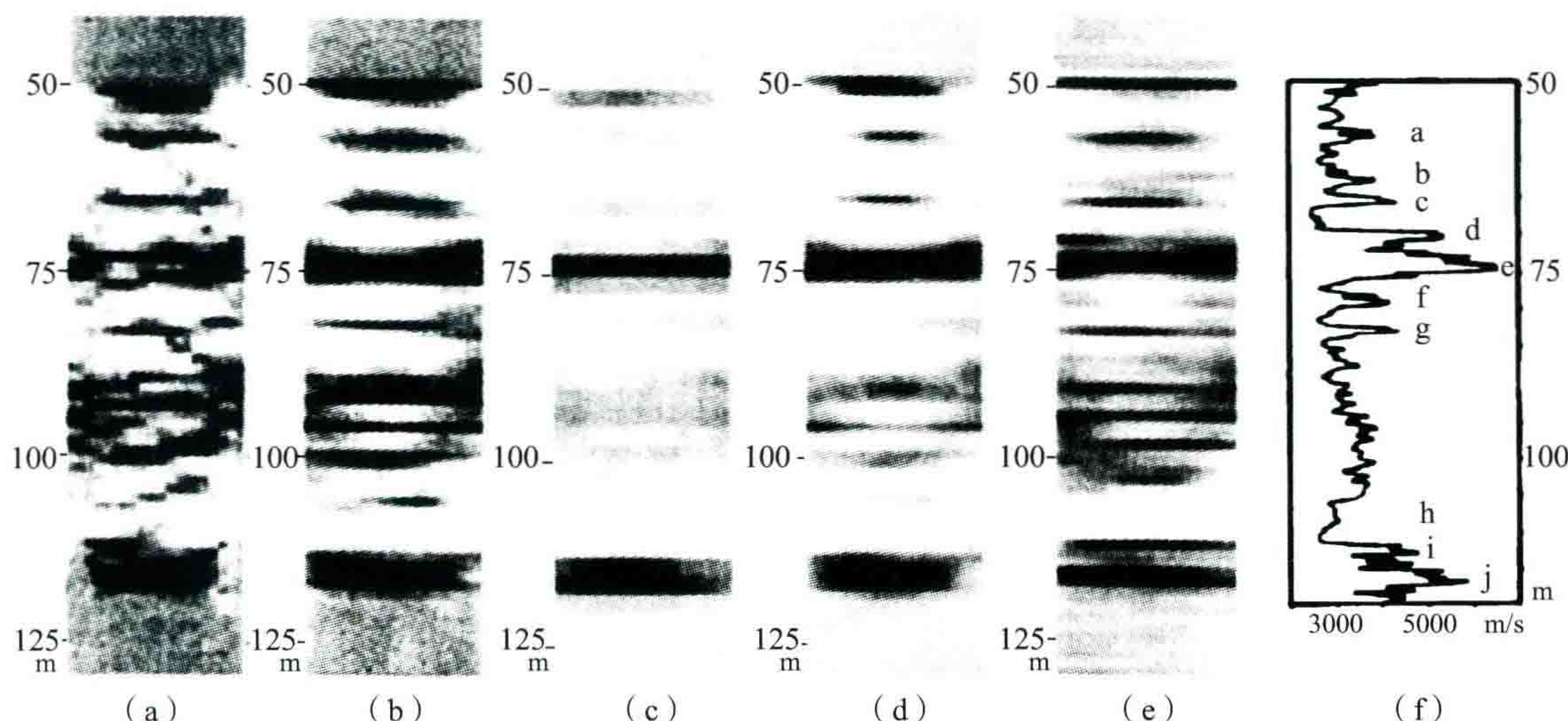


图 8　用各向同性和各向异性方法进行层析反演的记录的对比

(a) 各向同性反演未加约束条件；(b) 各向同性反演加了先验约束条件及横向平滑；(c) 各向异性反演加了先验约束条件及横向平滑；(d) 各向异性反演；(e) 用两口井的声速曲线作为控制约束条件在两井间反演；(f) 实际的声波速度曲线(图中 a、b、c、d、e、f、g、h、i、j 均为层位号)

图 8(c)、图 8(d)和图 8(e)是用各向异性方法进行层析反演的记录。其中图 8(c)是用三参数 υ、δ、ε 直接做反演，同时求 δ 和 ε，反演中加了约束条件(速度为 2200～6700 m/s)及横向平滑，该记录效果仍然很差；图 8(d)是先做初步速度反演，再引入各向异性参数 δ 和 ε 反演，该结果稍好，但是还有多层显示不合理；图 8(e)是用两口井中的声波测井曲线作为控制约束条件(采用测井的内插模型)在两井之间进行层析反演的记录，该记录基本上与声波曲线[图 8(f)]吻合；图 8(f)是实际的声波速度曲线。

该文章的作者 Williamson 等在结束语中说："在层析成像中考虑各向异性有助于精确成像，并提高其结果的可解释性，至少它可以减少畸变，区别假象，但只有在速度扰动不大、射线角度理想的区域，才能获得各向异性参数的精确成像。否则，速度误差与各向异性参数之间的转换，将使一切成为徒劳。"[3] 笔者认为在本实例中，由于地层中存在着高速薄层，射线很快超过临界角，试图做好井间层析反演将非常困难。

二、井间地震勘探比较成功的实例

(一) 实例一

图 9 是井间地震进行层析反演成像的一个成功实例。图 9(a)是井间的激发—接收系统，接收点深度为 7510 ft，共 100 炮，炮距为 50 ft，主频为 700 Hz，反射目标区位于两井中间，在激发、接收点的下方，深度为 7900～8300 ft，厚度 ΔZ 为 400 ft；图 9(b)是图 9(a)的共接收点道集记录，其中有反射波和上行波等。在该例中，先用 *F-K* 方法分离出上行波，再做克希霍夫偏移；图 9(c)是用两井的声波速度和波阻抗反演偏移后的结果，其中间有产层，产层附近有许多反射，笔者前面列举的实例中是对两井间的所有地层都进行偏移，而该例中只对两井中间的一部分地层[图 9(a)中目标区]做了反演；在图 9(d)中，井下波长为 10～15 ft，约有 35 个相位。地面普通的三维资料中波长为 200 ft，只有 4 个相位。可见井间层析反演记录的主频和分辨率都比地面地震记录有了很大的提高。笔者认为在该例中，层析反演只用了中间的一部分资料。以保证许多射线的入射角都小于临界角，所以是一个比较成功的例子。

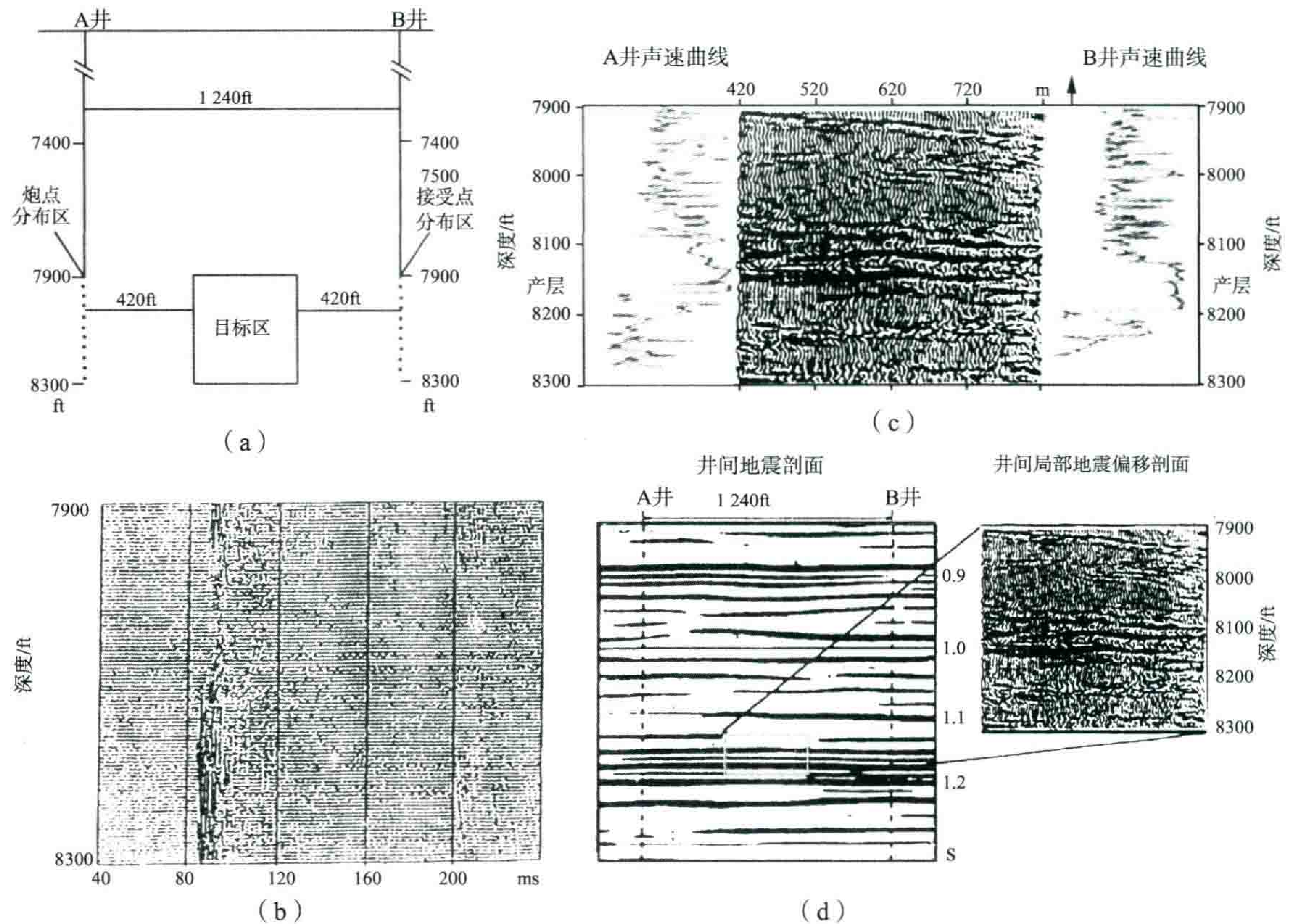


图 9 对井间部分地层的层析反演成像结果

(a) 井间的激发接收系统;(b) 共接收点道集记录;(c) 用两井的声速和波阻抗反演偏移后的结果;

(d) 对两井中的部分地层(图 9a 中的目标区)做反演偏移的结果

(二) 实例二

图 10 是井下地震合成记录、井间地震道及井旁普通地震道的对比图,该例也是一个比较成功的实例。在该例中,两井相距 100 ft,接收点固定不动,移动炮点,勘探区域深度为 2160~3000 ft,井旁地震道的频宽为 10~60 Hz,合成记录的频宽为 300~2000 Hz,平均在 900 Hz 以上。该井间地震记录分辨率很高,与合成记录分辨率一致,大致可以查明厚度 1 m 左右的砂层,并且可以看出同相轴的横向变化。例如,在深度为 2700 ft 附近的声波曲线上有两个小尖峰,厚度约为 1 m,在其右方合成地震道及井间地震道上都有其对应的地震响应。该记录之所以很好,关键在于两口井相距很近,射线的反射角大部分都小于临界角。射线在两井间的反射情况如图 11 所示。另外,图 10 的井旁地震记录中间部分是空白,没有比较明显的峰值显示,是因为在该区域中射线的入射角超过了临界角(或 45°),基本上是直达波,未做成像处理。

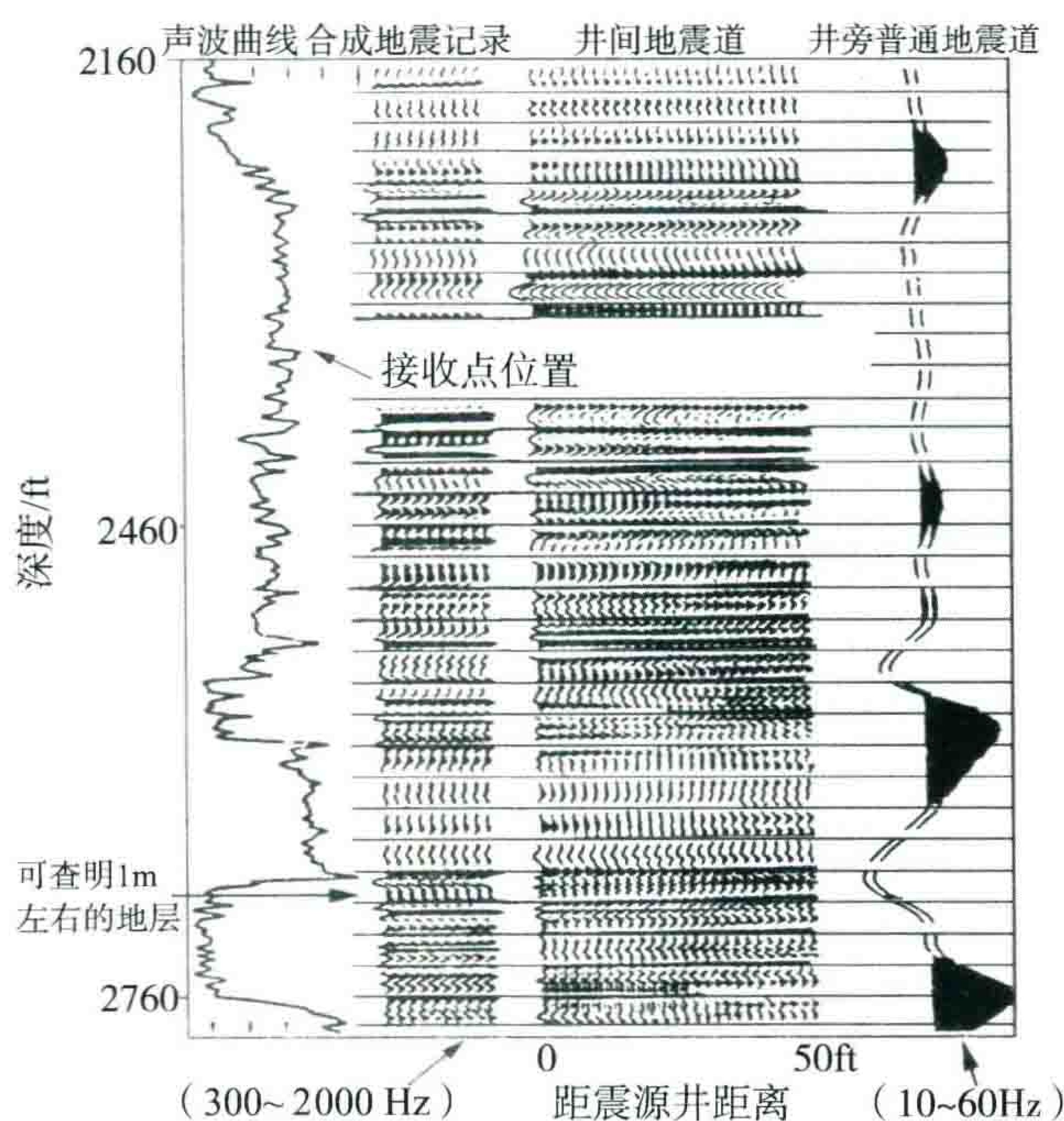


图 10　井下地震合成记录、井间地震道以及井旁地震道的对比

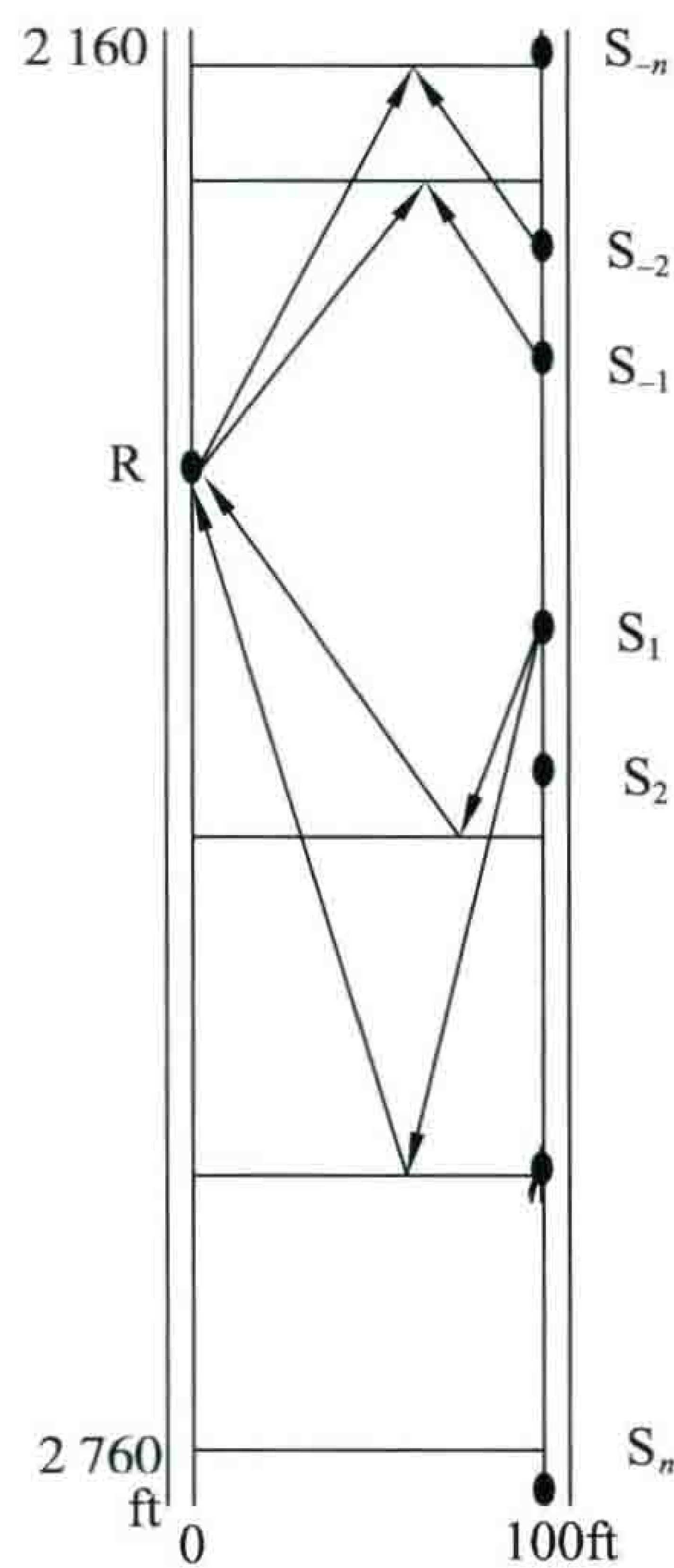


图 11　井间地震的射线反射路径

三、瞬时波场分析

（一）Snap Shot 试验

为了分析井间地震存在的问题并找出其解决方法，我们设计了一个水平层状介质中地震波传播的理论模型试验。该试验采用多层砂、泥、灰岩互层的水平层状介质模型，由 100 个小层组成，每层厚度为5 m，其中砂岩占 40%、泥岩占 50%、灰岩占 10%，并用计算机随机产生由这些小层组成的剖面，如图 12 所示。该模型总厚度为 500 m，埋藏深度为 400～900 m，在 400 m 以上是泥岩，在 900 m 以下是灰岩，在这两个地带地层是均匀的，而在 400～900 m 范围内的地层非常复杂。本模型采用了砂、泥、灰岩的常见典型数值，密度由 Gardner 公式求得，具体参数见表 1。对此模型采用弹性波波动方程正演得到激发后的瞬时波场图（称为“Snap Shot”），如图 13 所示。

震源布设在模型中间，深度为 650 m，采用弹性波动方程进行正演模拟，每隔 50 ms 记录一次波场，在 50、100、150、200 ms 时的波场如图 13 所示。

现取图 13d 单独放大进行分析（图 14）。在图 14 中，上下两部分非常清晰，笔者称为波形简单区，虽然其中也有层间多次反射，但上、下两部分的上行波和下行波很单纯，说明该区域的射线没有超过临界角。这种情况与通常地震勘探在地面上接收到的波场是一样的。用这部分波场做反演，就能把地下的地层情况反演出来。层间多次反射可以通过反褶积及波场分离技术来消除。总的来说，这上、下两部分波场就是人们经常利用的有效波场。

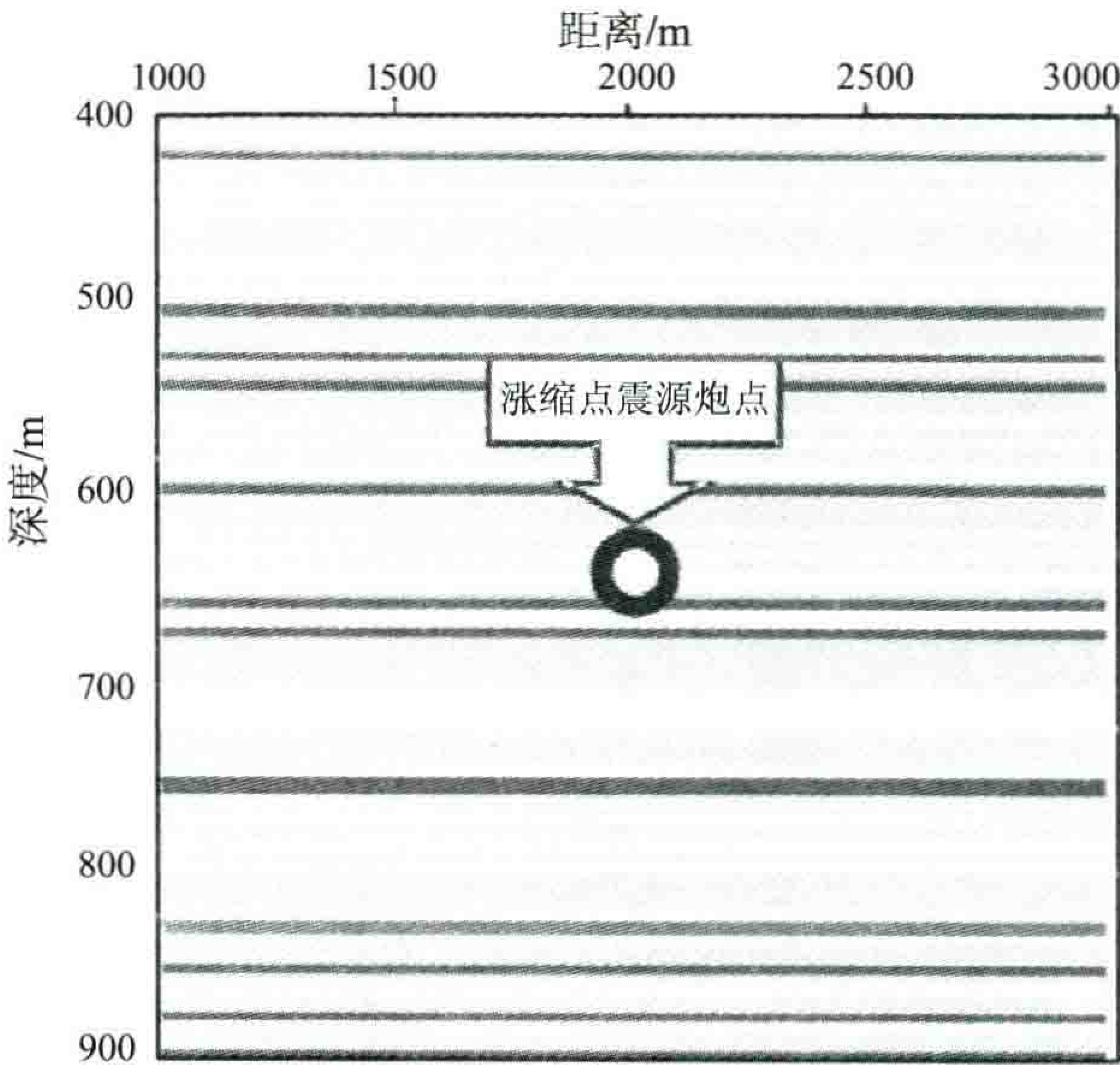


图 12 水平层状介质模型

图中白色表示泥岩；灰色表示砂岩，黑色表示灰岩

表 1 三种不同岩性常用的典型参数表

参数	400 m 以上均质泥岩	砂岩	泥岩	灰岩
v_p/(m/s)	2535	3181	2877	5000
v_s(m/s)	1152	1674	1438	2778
v_p/v_s	2.2	1.9	2.0	1.8
泊松比 σ	0.370	0.308	0.333	0.276
ρ/(g/cm^3)	2.20	2.328	2.270	2.60

在图 14 中，左、右两侧区域出现两个波场紊乱地带，笔者以形象语言称之为“牛角尖”，“牛角尖”里面波形非常复杂。由于本次模型地层是水平的，在炮点激发后，弹性波遇反射界面发生反射，当入射角大于临界角时，就会进入“牛角尖”。其内部波场非常复杂，包括各种各样的转换波，如各层的全反射、P-S 波、P-S-S-P波等波形，并且各波形之间的能量分配十分复杂，难以进行反演。因为佐普利兹方程也只能表达无限大半空间中单一反射界面的波形和能量分配规律，而对于许多个薄互层，就很难计算波场。例如 Brehoffsky 在《在层状介质中的波》一书中，曾列出了无限多个水平层状介质中弹性波的传播公式，极其复杂。其反演问题以当前的技术水平难以解决。

在“牛角尖”内，由于层速度高达 5000 m/s(如在灰岩中)，但高速薄层所产生的纵波折射滑行波其能量迅速地随距离而衰减，并很快接近为零，当初至波到达该区域时，波已经没有能量了，因此初至拾取非常困难。实际上，此时射线追踪的理论基础已经动摇。图 14 中的①、②、③分别是泥岩、砂岩和灰岩在 $t=200$ ms 时由理论计算的波场初至位置($v_{泥岩}=2877$ m/s，$X_{泥岩}=576$ m；$v_{砂岩}=3181$ m/s，$X_{砂岩}=636$ m；$v_{灰岩}=5000$ m/s，$X_{灰岩}=1000$ m，其中 X 代表传播距离，具体参数见表 1)。由图 14 可见，实际模型波场的初至和理论计算的泥岩、砂岩和灰岩的初至有很大差别，仅根据“牛角尖”中的图像是无法辨别和正确读取初至的。

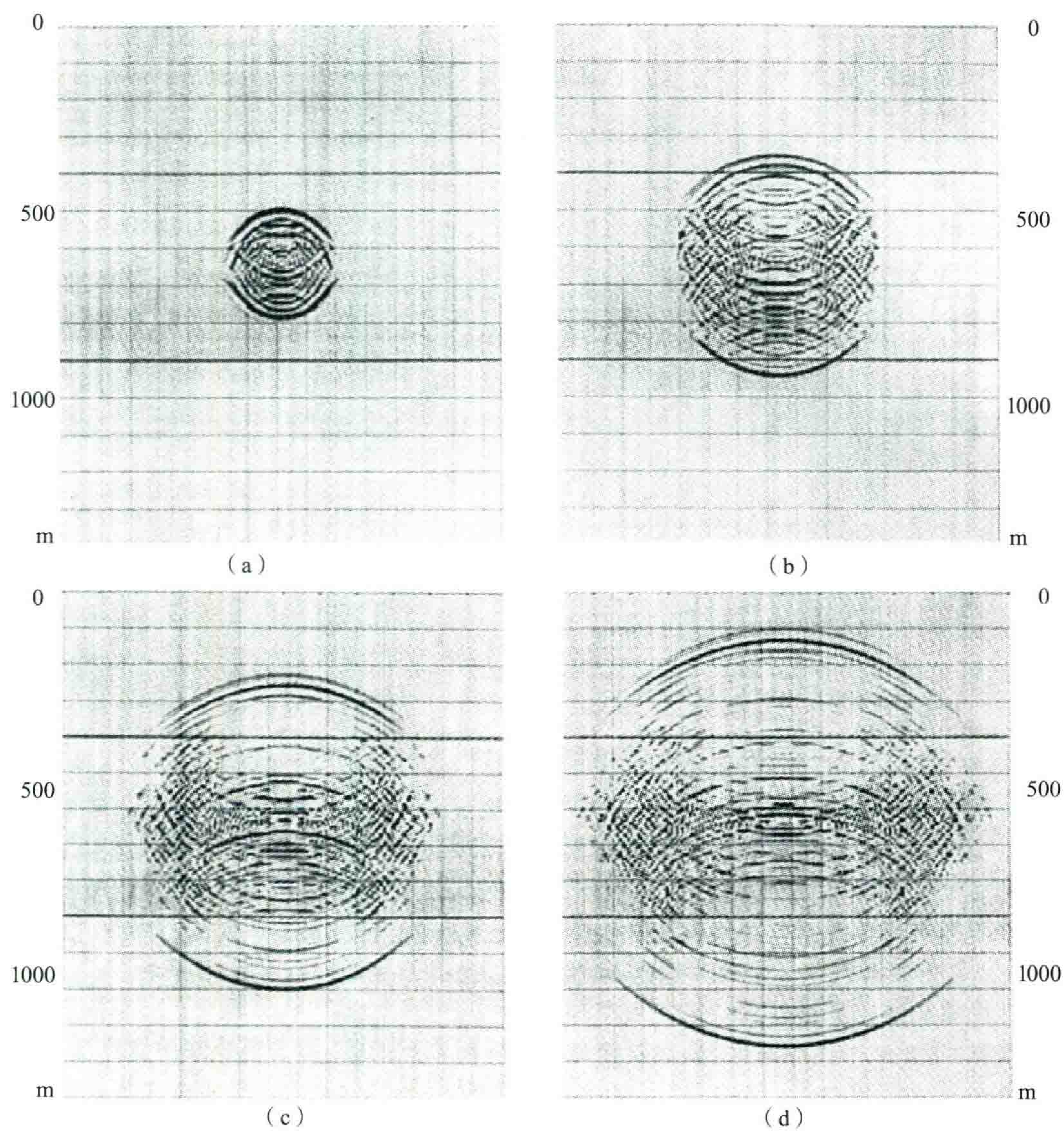


图 13　水平层状介质中地震波传播的瞬时波场图

(a) $t=50$ ms；(b) $t=100$ ms；(c) $t=150$ ms；(d) $t=200$ ms

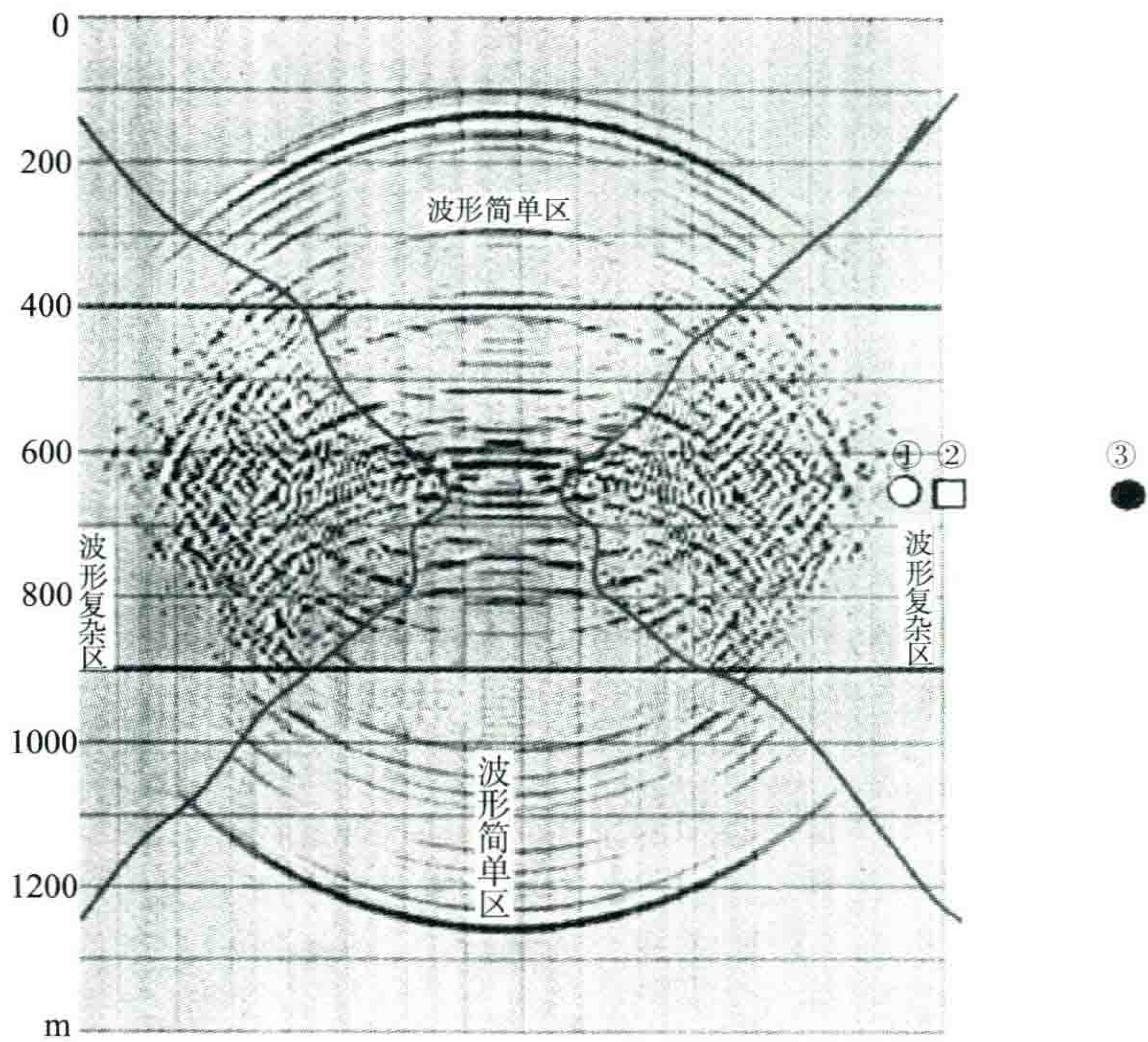


图 14 在 200 ms 时水平层状介质中瞬时波场的分析

① 为泥岩初至位置；② 为砂岩初至位置；③ 为灰岩初至位置

本文图 13 及图 14 中绘的是振动方向为铅直(垂直分量 Z)的瞬时波场,“牛角尖”里读取波的初至是几乎不可信的。东方地球物理公司研究院的严又生同志曾尝试用波的水平分量 X 作分析,他指出水平分量 X 的初至就比较清晰。但我们认为,即使采用水平分量,在入射角大于临界角的情况下,各种转换波、层间多次反射波极为复杂,并且由于高速薄层产生的纵波折射滑行波,其能量随距离迅速衰减为零,于是水平分量的初至也变得十分难认。

(二) 物理模型实验

此外,石油大学(北京)[现中国石油大学(北京)]2002 年做了一个研究井间地震的理论模型实验(采用数学模型和水槽物理模型,本文引用该试验中的模型 4)。该模型由不同速度的介质组成,在深度为 73～80 m 范围内有一低速薄层,在深度为 120～140 m 范围内有一高速透镜体,在 156 m 附近有一高速断层。观测系统参数为:井间距为 100 m,起始炮点深度为 1 m,炮点间距为 1 m,共 201 炮,每炮共有 201 个接收点,起始接收点深度为1 m,接收点间距为 1 m。图 15(a)为数学模型中第 130 炮的合成地震记录,在图 15 中 A—B—C—D—E 段是模型理论计算的初至,其中 C—D 段在实验记录中没有任何能量,即使采用振幅增强显示[图 15(b)]也不能使该段初至显示出来。可见水槽物理模型实验也得到了和图 14 相同的结果。

总之,“牛角尖”内的波场非常复杂,很难进行初至拾取,因此基于初至拾取的各种层析反演不能获得正确的结果。即使频率很高也无法利用。

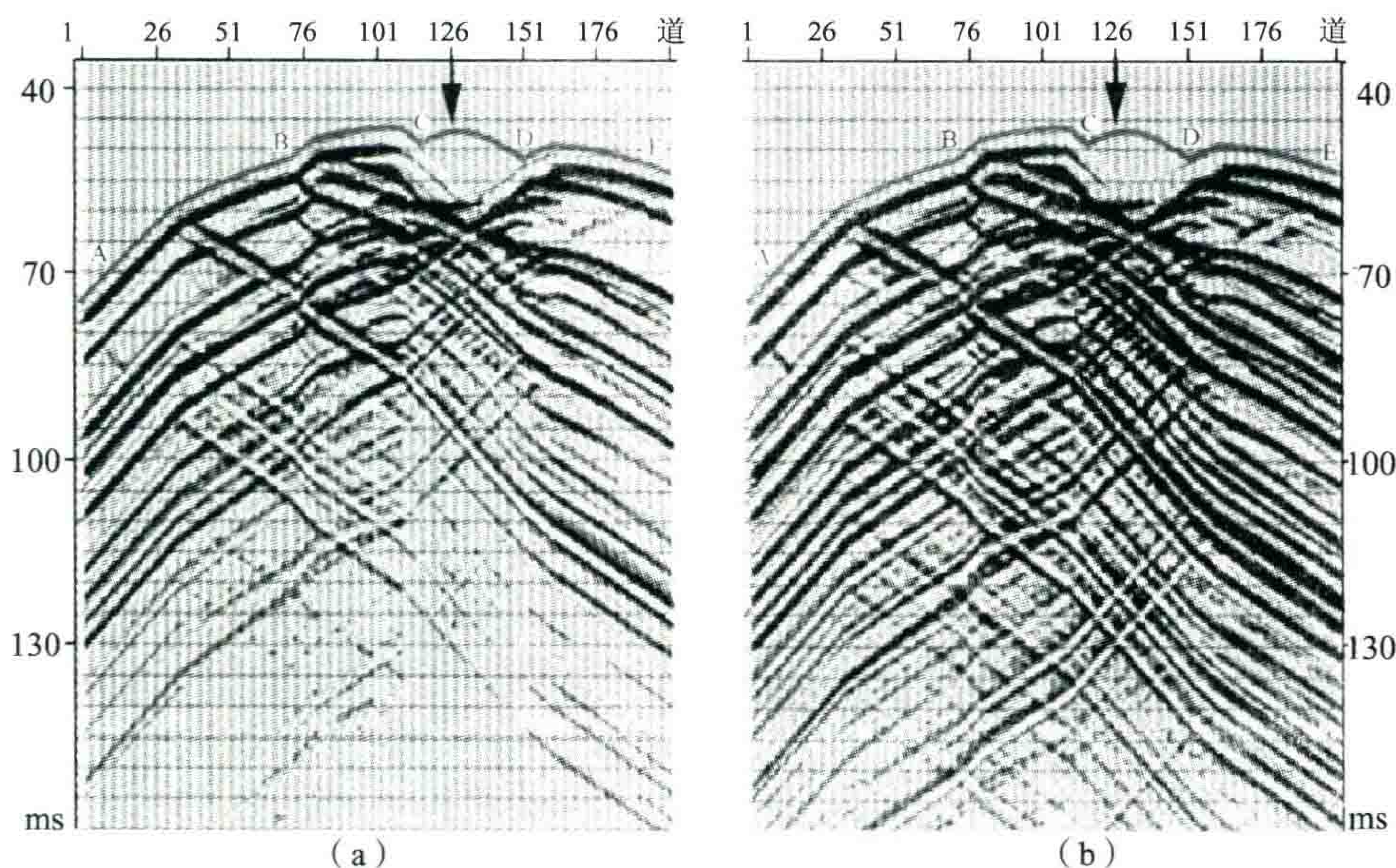


图 15 第 130 炮的合成地震记录(a)及其增强显示(b)

有一个现象需要注意，在图 14 的中央部分，两个牛角尖的中间，有一些较水平的反射波场，这是双程时为 200 ms 左右的上行反射波及下行透过波(反射波的圆弧朝上)，这便是我们普通反射记录上 0.2 s 所接收到的反射波。对比图 13(a)、图 13(b)、图 13(c)及图 13(d)，可见到中央正常反射区在逐渐扩大，两个牛角尖向两边移动。这种现象给我们一个启示，即如果不拾取初至，我们可以在两倍初至到达时间的后面接收到比较单纯的、续至的反射波场(当然包括上行及下行波场)，它们是比较简单的纵波。显然，这些波的射线入射角都没有超过临界角。在上、下行波分离后，利用克希霍夫积分法(或 VSR-CDP 法)就有可能使这些续至反射波正确成像。这也就是前面图 9 及图 10 两个实例之所以能取得成功的原因。

四、井间地震的误区及出路

下面具体分析一下当前井间地震的误区，以便从中找出今后井间地震勘探的出路。

(一) 井间地震的误区及分析

我们通常在地面做地震勘探时，地层倾角不大，激发后的波场如图 16(a)所示，接收到的波场入射角往往小于 45°，位于有效接收区域内，因此地震勘探工作非常有成效。

笔者于 20 世纪 80 年代陪同一个美国考察团到青海柴达木盆地考察。在车路沟看到侏罗纪地层全部直立甚至倒转，笔者请教考察团成员——南加州大学的 Clayton 教授，在如此复杂的地区进行地震勘探能否得到反射成像，他立即表示否定。图 16(b)是地层直立时的波场，地震勘探接收到的是来自“牛角尖”内的反射波，波场非常复杂，无法进行解释。车路沟侏罗系就是一个由于地层直立使地震勘探工作无法进行的很好的例子。

图 16(c)是在水平层状地层中做井间地震的波场情况。假设在一口井中激发，在另一口井中接收，通常接收到的波场很大一部分都落在了“牛角尖”之内，从而导致地震资料难以用于正确解释的情况。

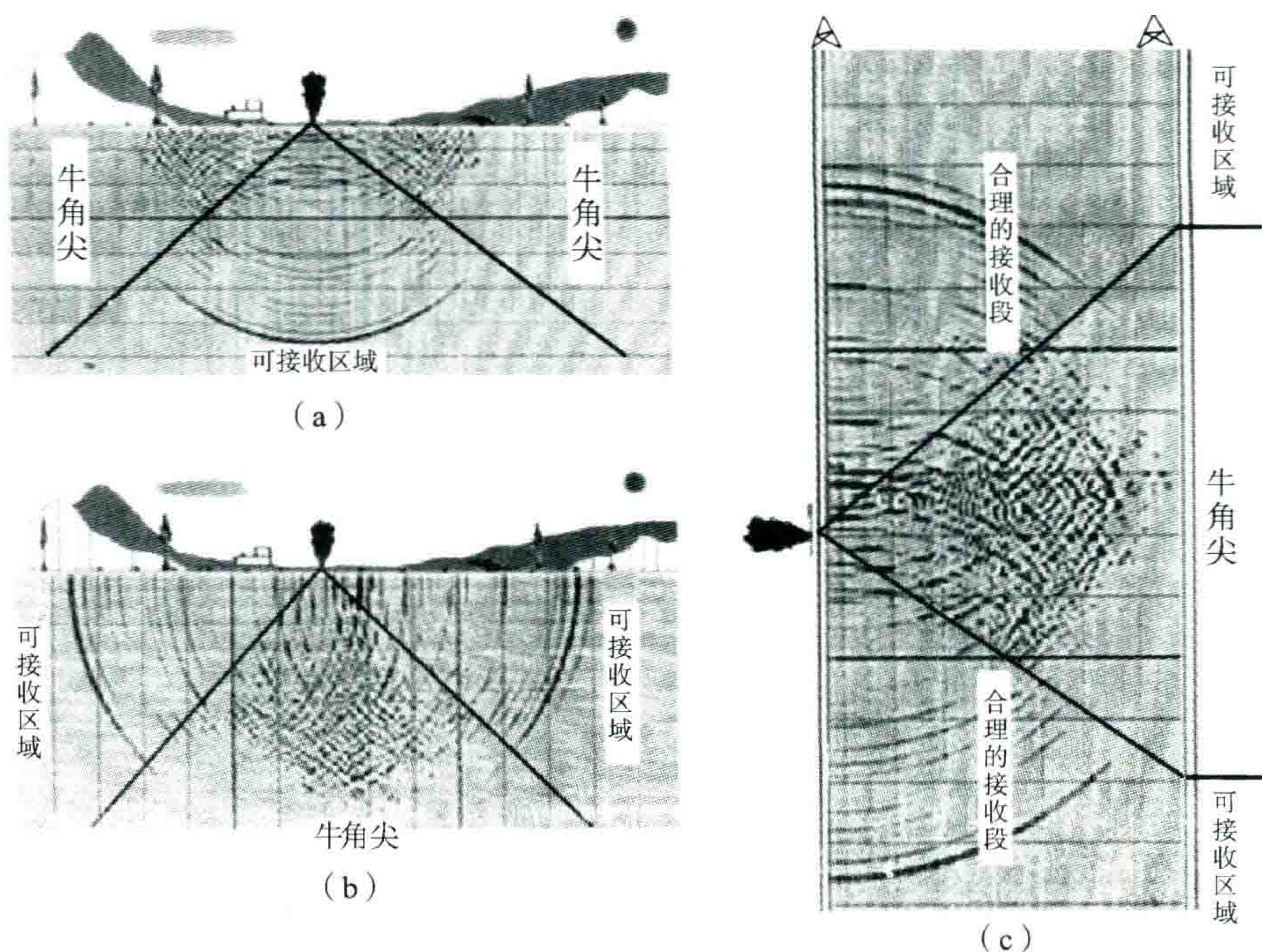


图 16　地层水平(a)、直立(b)和井间地震(c)的波场情况

如果自然界中地层的临界角小于 10°,那么我们只能接收到炮检距很小时的一小段记录,也就是说地震勘探工作至今还可能在黑暗中摸索。好在砂、泥、灰岩的临界角一般都为 10°～45°,才使我们能看清 45°区域以内的反射波(如图 14 中的波形简单区)。正因为有此区域作为反射地震勘探的基础,反射地震法才得以取得今天的辉煌业绩。

(二)今后的出路

井间地震勘探的出路在于设计井间地震观测系统时,应当力求将射线的入射角控制在临界角以内。

1. 出路 1:观测方式的布设大有讲究

接收段应布置在炮点下方(或上方),在垂直距离上应错开一个井间距,即距炮点水平线一个井间距以上,并确保接收点不落入"牛角尖"内,如图 17 所示。在施工时,从下向上同时移动炮点和接收点,如果检波器个数足够多,可以在炮点上方和下方合理的接收段内同时接收,在进行资料处理时,将数据进行叠加,能够提高勘探的精度。

另外,施工前要经过严格的论证,以确保大部分射线的入射角在临界角以内。例如,当井间距为400 m时,炮点和检波点的最近距离应该大于 400 m/cos45°≈566 m。同时,为了保证检波器能接收到足够强的信号,震源要有充足的激发能量。

2. 出路 2:资料处理中的关键

在进行资料处理时,可以加入一些新的算法软件,计算每条射线的入射角,将入射角大于临界角(或 45°)的射线剔除,不参与井间地震的反演。

文中的控制角度是指控制射线在反射界面上的入射角,它和压制管波时的"限角处理"不同。

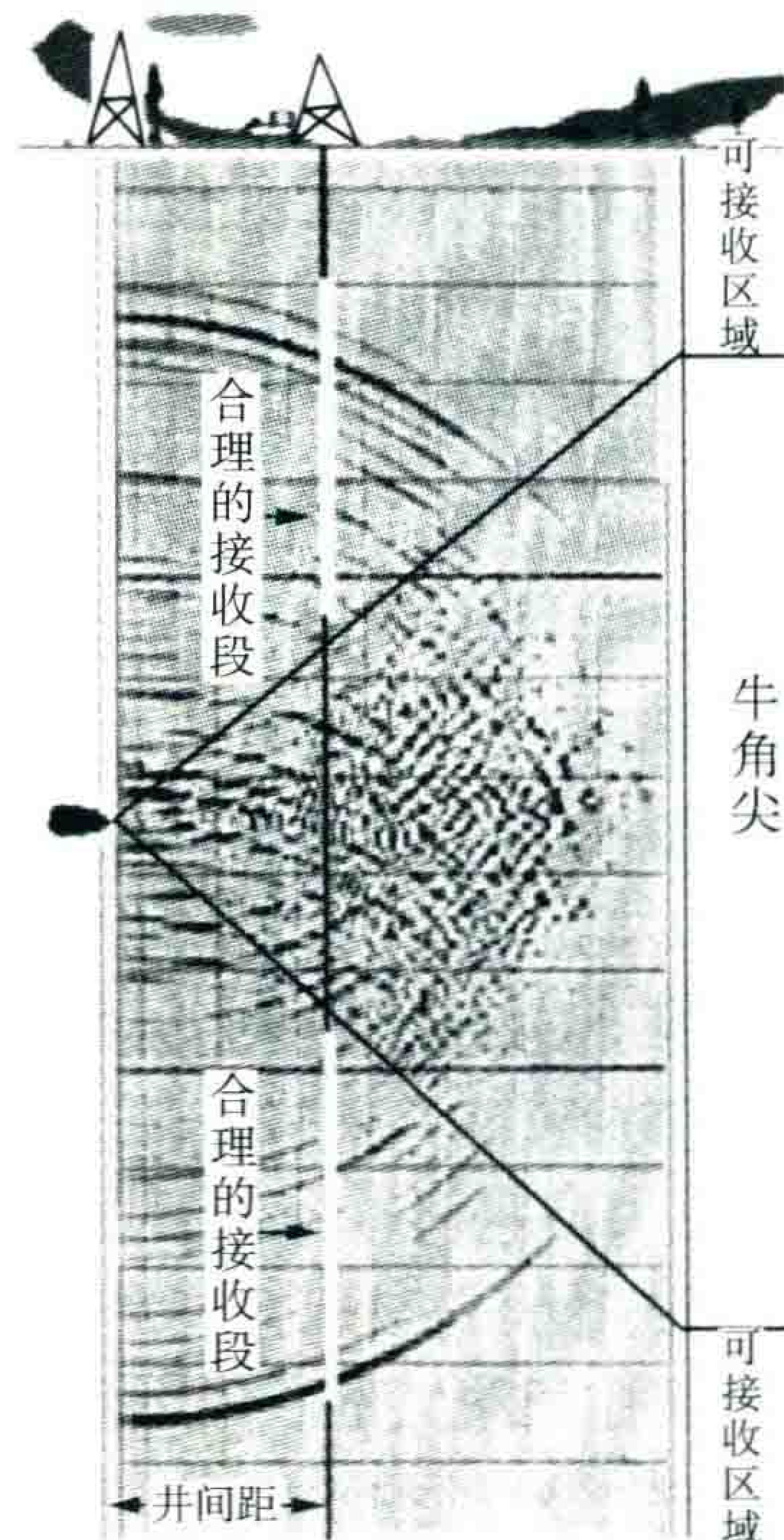


图 17　合理的井间地震接收段示意图

3. 出路3:重新处理以往采集的资料可能尚有潜力

如果原来的井间地震不再重新施工,可以将以往采集的资料按上述原则利用续至反射波作积分法反射成像,重新处理,可能还有改进的余地。例如罗家地区的实例,我们可以每次计算一个VSP-CDP,将入射角大于临界角的射线都剔除掉,用剩下的射线作反演,可能会有新的改进。希望今后能用该方法重新处理罗家地区的资料,以验证其可行性和效果。

本文所提出的建议,更准确地来说,不再是一般概念的井间地震方法,而是通常的反射地震法,不过炮点不是放在地面,而是放在靠近目的层处进行反射地震。普通的反射地震法在地面进行时,反射波被地层吸收以后,主频很低,如果将该方法在井间进行,就有可能提高分辨率。

结语

笔者认为,目前井间地震勘探研究进展缓慢的原因在于人们忽略了佐布利兹方程和波动方程有关波的传播和入射角的概念,陷进了井间地震勘探的误区——"牛角尖"。本文通过列举国内外井间地震失败和成功的实例,分析了目前对井间地震认识上存在的问题,提出了我们今后发展井间地震的出路,希望能够对井间地震勘探的发展有所帮助。此外,笔者认为井间地震还有一些其他的课题需要解决。

(1)射线追踪有盲区。目前对井间地震资料的处理和解释多数仍使用射线理论,实际上在复杂地区进行地震勘探时,射线在各个方向上的分布很不均匀,甚至有些地方出现盲区,没有射线分布。如果对井间地震记录进行射线追踪,往往处于盲区内的网格点上没有射线,因此很难正确成像。

(2)上、下行波的分离技术还存在较多的问题,尤其是用 F-K 滤波分离上、下行波时问题较多,很难完全分离干净,而且有时还容易出现假象(例如同相轴的扭曲和蚯蚓化等)。

处于发展中的井间地震勘探还存在很多问题,而井间地震勘探又是人们期盼解决油田开发领域的最有远景的方法,因此需要靠大家的共同努力来推进井间地震勘探的发展。

东方地球物理公司研究院方法室弹性波理论组做了Snap Shot正演模型试验,此外,文中采用了石油大学模型实验的中间成果作为一个实例,在此一并表示感谢!

参考文献

[1] ZHOU H, MENDDZA J A, LINK C A, et al. Crosswell imaging in a shallow unconsolidated reservoir[J]. The Leading Edge, 1993,12 (1): 32-36.

[2] 周建宇,何惺华,李安复,等. 罗家地区井间地震方法与效果[J]. 石油地球物理勘探,2001,36(6): 745-753.

[3] WILLZAMSON P R, SAMS M S, WORTHINGTON M H. Crosshole imaging in anisotropic media [J]. The Leading Edge,1993,12(1): 19-23.

地震高分辨率勘探中的误区与对策

本文总结了我国在高分辨率地震勘探方面的攻关成效，指出在海上高分辨率地震已经取得很大的进步，但是在陆上，由于一些旧观念的误区，妨碍了我们前进。例如，传统的做法：小药量，不组合，取消前置滤波，盲目追求好仪器。在我们看来这些观念都要重新认识。

此外，陆上高分辨率勘探的主要矛盾已经转化为刮风引起的高频噪声，它才是我们的主要敌人。分频扫描可以说明这个问题。为了克服高频干扰，特别应该注重检波器的埋置条件。

有人以为有了先进的仪器就能得到高分辨率的剖面，这是“唯武器论”的反映 。实际上，我们的仪器的技术指标已经大大超过了施工环境的要求。因此，关键在于精心的施工和技术方法的对路。

此文 1997 年 8 月发表于《石油地球物理勘探》第 4 期，作者李庆忠。

摘　要

高分辨率勘探在工程地震、煤田及浅油层勘探方面已经取得了较好的成效。我国最近在南海利用高分辨率勘探寻找气田也取得了十分可喜的成绩。但在广大陆上石油地震勘探中，尚无明显的突破。究其原因，主要是由于我们在几个关键认识上走进了误区。本文从高分辨率的野外采集仪器到施工质量以及处理程序等关键环节上分析了目前存在的一系列错误的传统概念，并指出了前进方向。

关键词

高分辨率勘探　地震仪　模数转换　检波器　耦合　谐振　数据采集　信噪比　接收条件　激发条件

一、我国高分辨率勘探的现状

（一）南海莺歌海盆地的高分辨率勘探有了新的突破

最近两年来，我国南海西部石油公司在高分辨率地震勘探方面做出了明显的效果。他们改进了气枪阵列的性能和定位精度，试验了气枪和电缆的合理沉放深度；摸索到了一套高分辨率的资料处理流程。在琼东南盆地中，无论是老资料的重新处理，还是新资料的精细处理都获得了丰硕的成果。

图 1 是莺歌海盆地 LD15-1 气田的一条高分辨率地震剖面，采用 0.5 ms 采样。这条剖面在 1.2 s 处主频为 130 Hz；1.4 s 处为主要含气目的层，主频为 100～120 Hz；到 1.8 s 处主频为 80 Hz。地质现象十分

清楚，中央部分是气侵上拱的奇特现象。图 2 是该区另一条测线 94G4510 的放大剖面，在 1.36 s 处可以清晰地看到气水分界面的平点。而图 3 是同一测线位置常规施工的 4510 测线的偏移剖面，其效果明显差得很多。在这个 LD15-1 气田上，通过高分辨率地震勘探，还在积分地震道和通过 AVO 处理的 P×G 剖面上，证实了 T_{19} 上部及 T_{20} 之下的 1.68 s 还有两套低电阻气层，后来为试油资料所证实，从而增加了气田的储量。

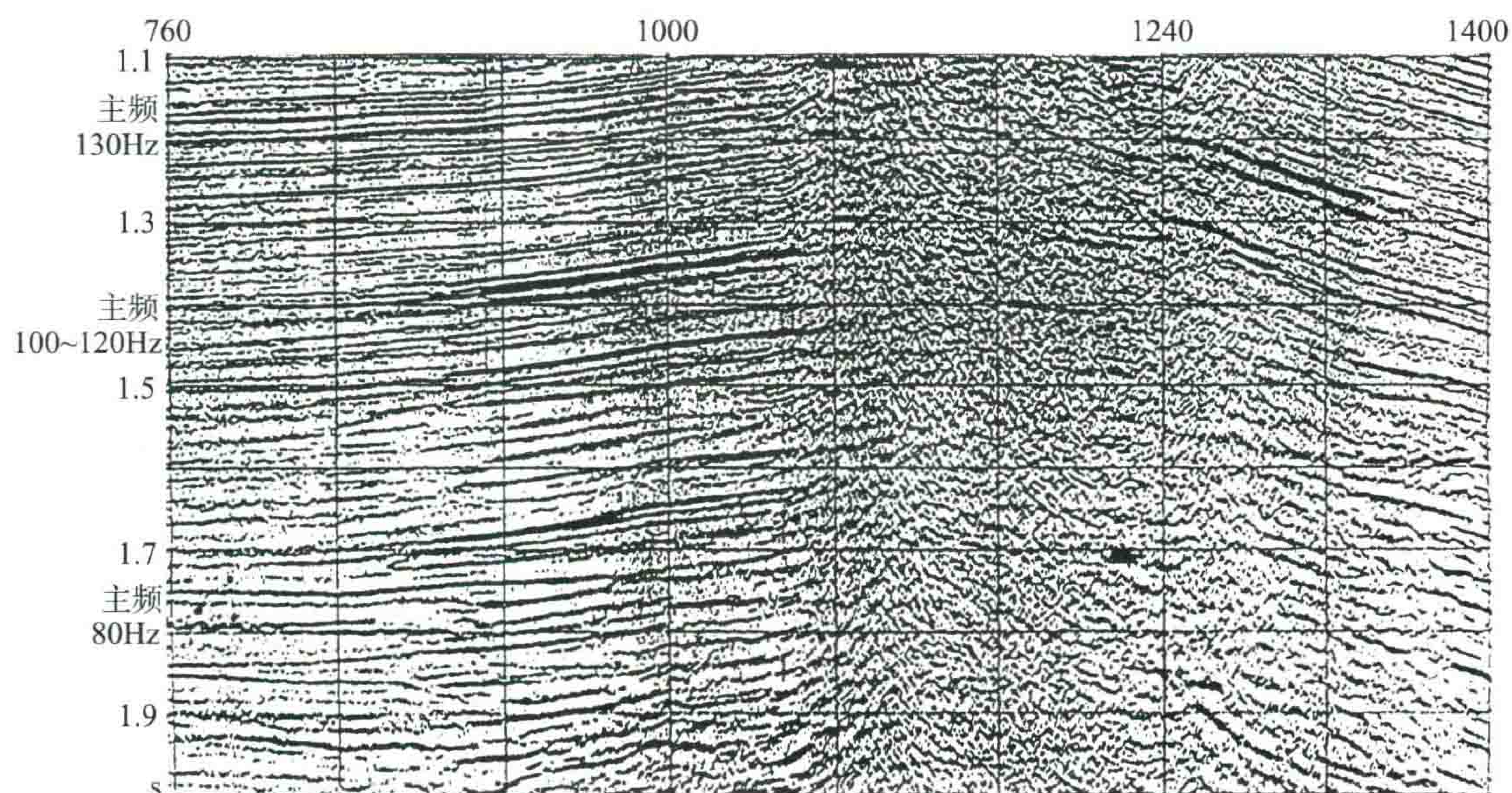


图 1　莺歌海盆地 LD15-1 气田的 94G3617 测线的高分辨率地震剖面

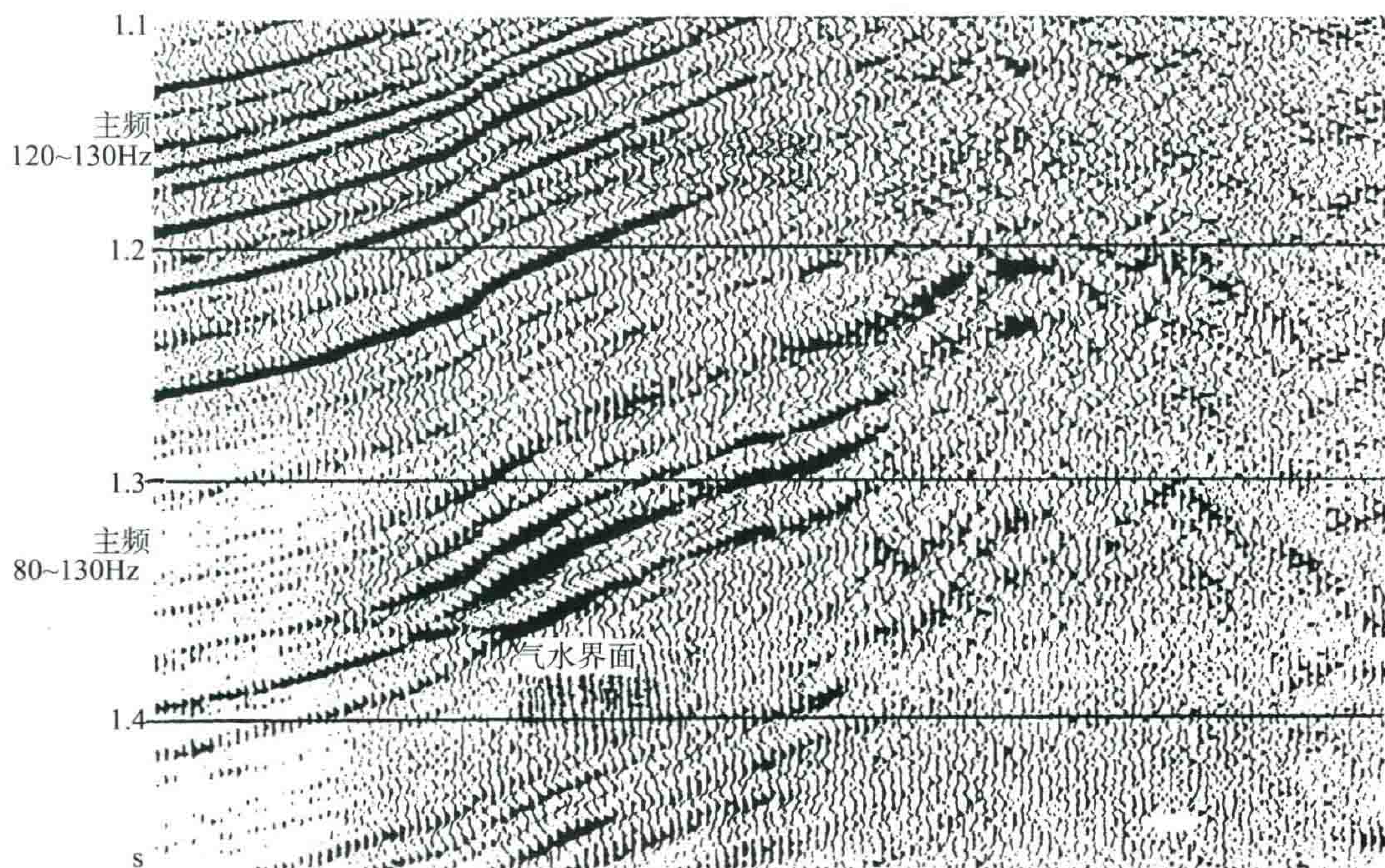


图 2　LD15-1 气田的 94G4510 测线的高分辨率放大地震偏移剖面

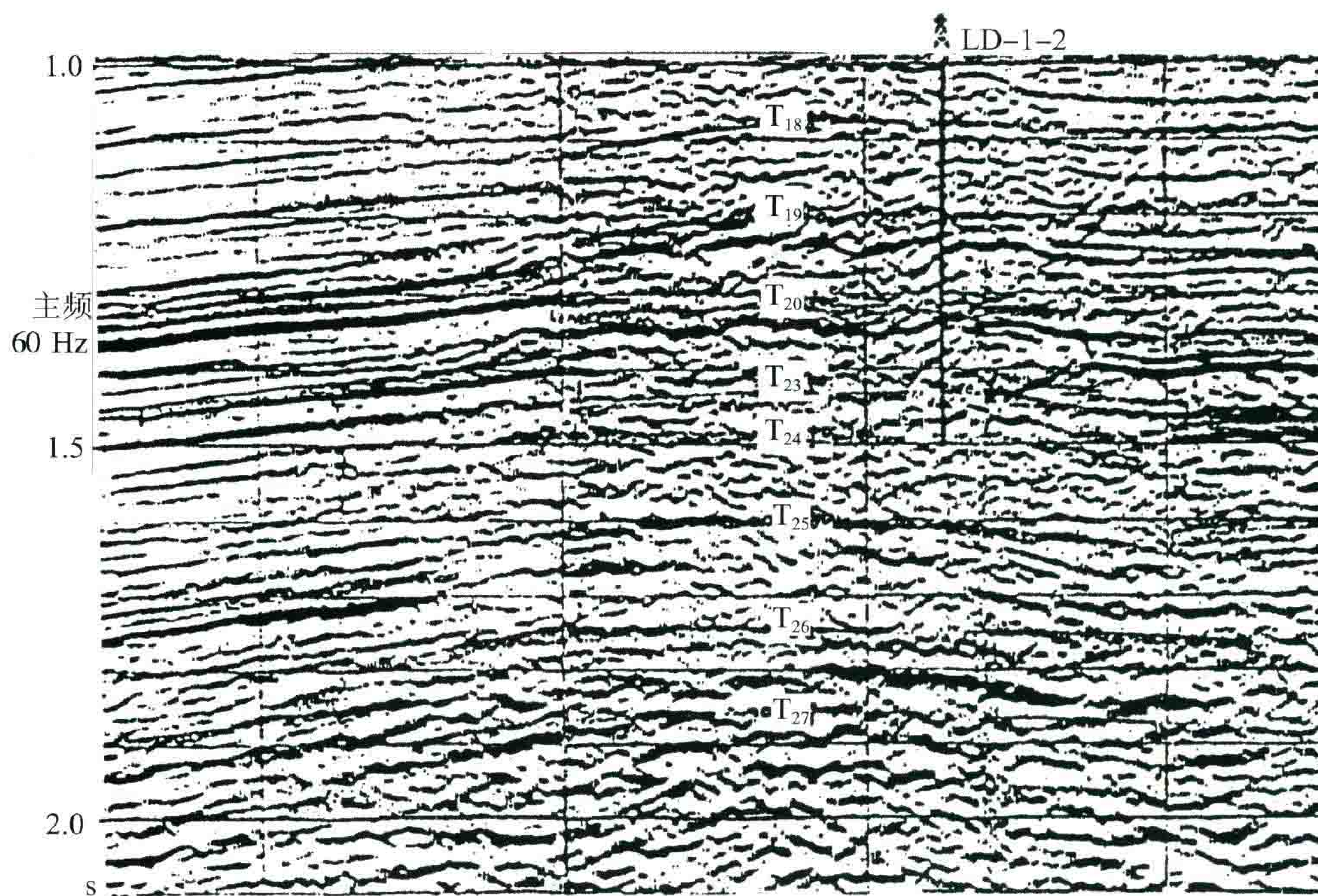


图 3 LD15-1 气田的 93G4510 测线常规地震偏移剖面

图 4 是 DF1-1 气田的一条高分辨率地震资料经过放大的积分地震道剖面，从中可以看到气砂组的分布及气水界面的平点反射(由于低速度的影响，平点有下拉 20 ms 的现象)。这样的剖面对油田开发非常有用，气砂层的厚薄变化一目了然。

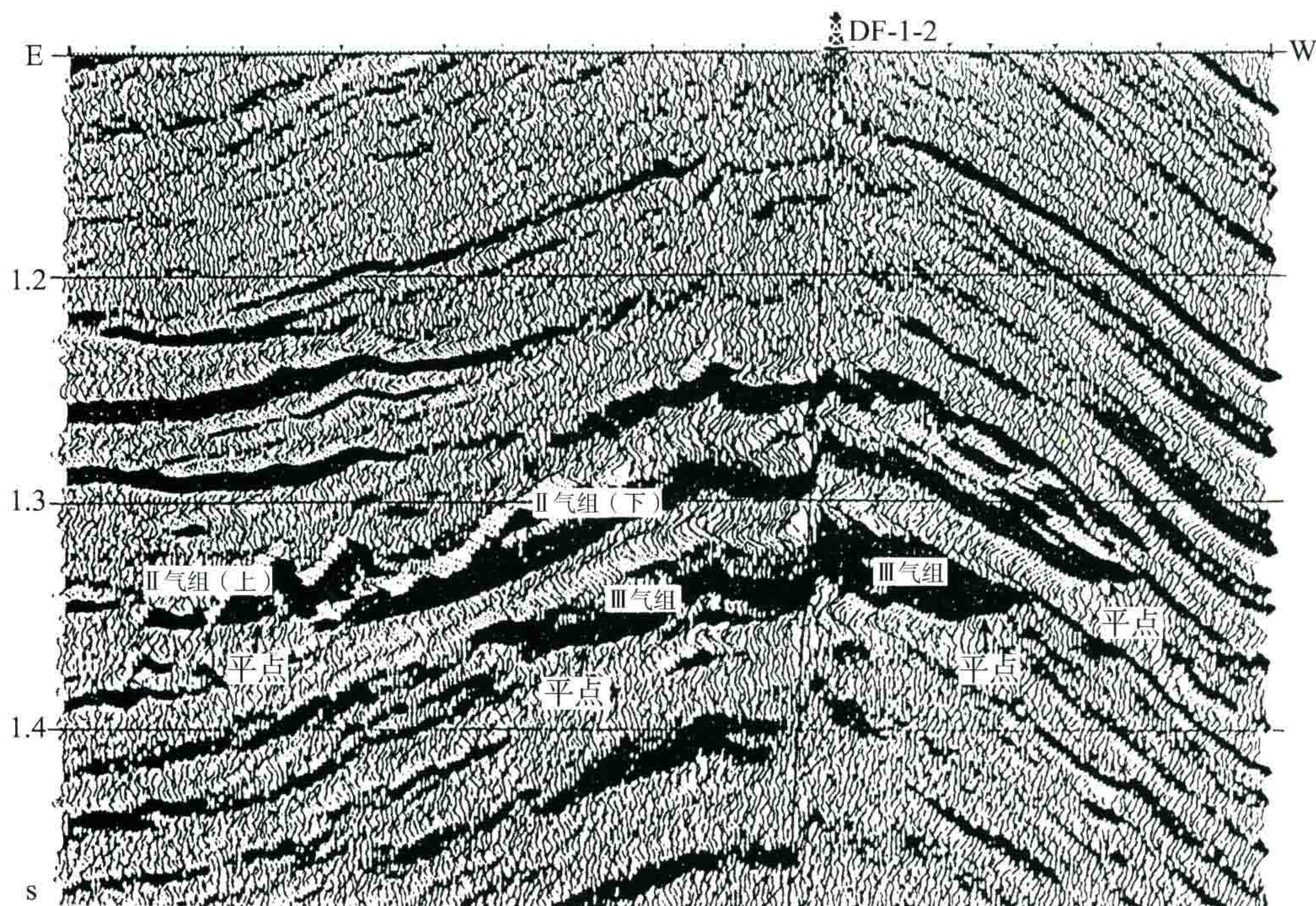


图 4 莺歌海盆地 DF1-1 气田的 94DF39 测线的积分地震道剖面

在莺东斜坡上，重新处理的高分辨率剖面与普通剖面的地质效果的差别也非常明显。

1991 年，曾在 DF1-1 构造上钻过一口探井，仅发现 7 m 薄含气砂层。当时许多人认为该构造没有工业价值。后来利用高分辨率的新资料，搞清了Ⅱ砂组主力产气层的分布，并用积分地震道计算其厚度约 18～20 ms，Ⅲ砂组厚 35～38 ms，都被后来的 DF1-1-4 井及 5 井所证实，分别获得天然气产量为 132×

10^4 m^3/d及 77.4×10^4 m^3/d，确定含气面积 230 km^2，成为我国海上第二大气田。

图 5 是常规剖面与高分辨率处理剖面的对比。后者无论在显示超覆接触关系，还是海底水道砂体的分布以及地层的层序界面的划分等方面，都提供了极为明确的图像。

以往，据常规地震资料的解释结果仅仅以为莺东斜坡的找油方向是单斜上的地层圈闭。经过高分辨率勘探之后，发现了 4 种不同类型的圈闭：挤压背斜、背斜加岩性、反向断层屋脊和潜山内幕背斜，从而打开了找气的新局面。

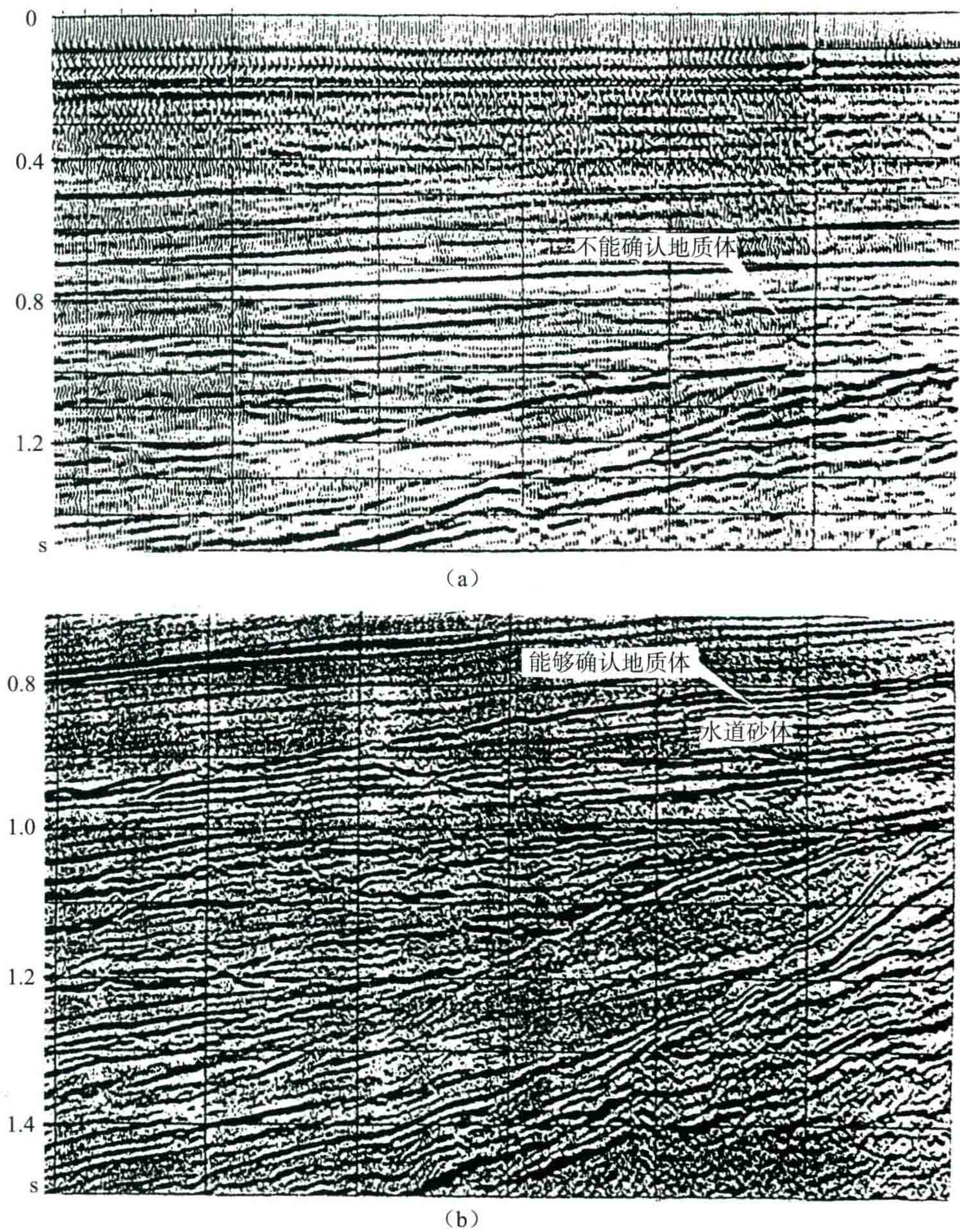


图 5 莺歌海盆地东北坡 G3473 测线新老偏移剖面的对比

(a) 常规偏移剖面；(b) 高分辨率偏移剖面

(二) 内蒙古赛汗塔拉地区的剖面主频达到了 100 Hz

相对地说，我国陆上石油地球物理勘探中的高分辨率系统工程的进展较为缓慢。虽然近几年来，也出现了大庆油田的试验剖面上在 1.5 s 左右获得了主频达 70～80 Hz 左右的好剖面，但还是没有更多的突破。

1994 年，物探局在内蒙古赛汗塔拉地区作了高分辨率试验，取得了较明显的进展。图 6 是 24 次覆盖的 SH-002 测线高分辨率叠偏剖面，在 1.1 s 左右主频达到 100 Hz。图 7 是过去同一位置的普通剖面，1.1 s处主频仅 40 Hz。图 8 是该测线高分辨率的彩色相对波阻抗（积分地震道剖面）。这是近年来我国所获得的分辨率与信噪比都很高的一个成功例子。

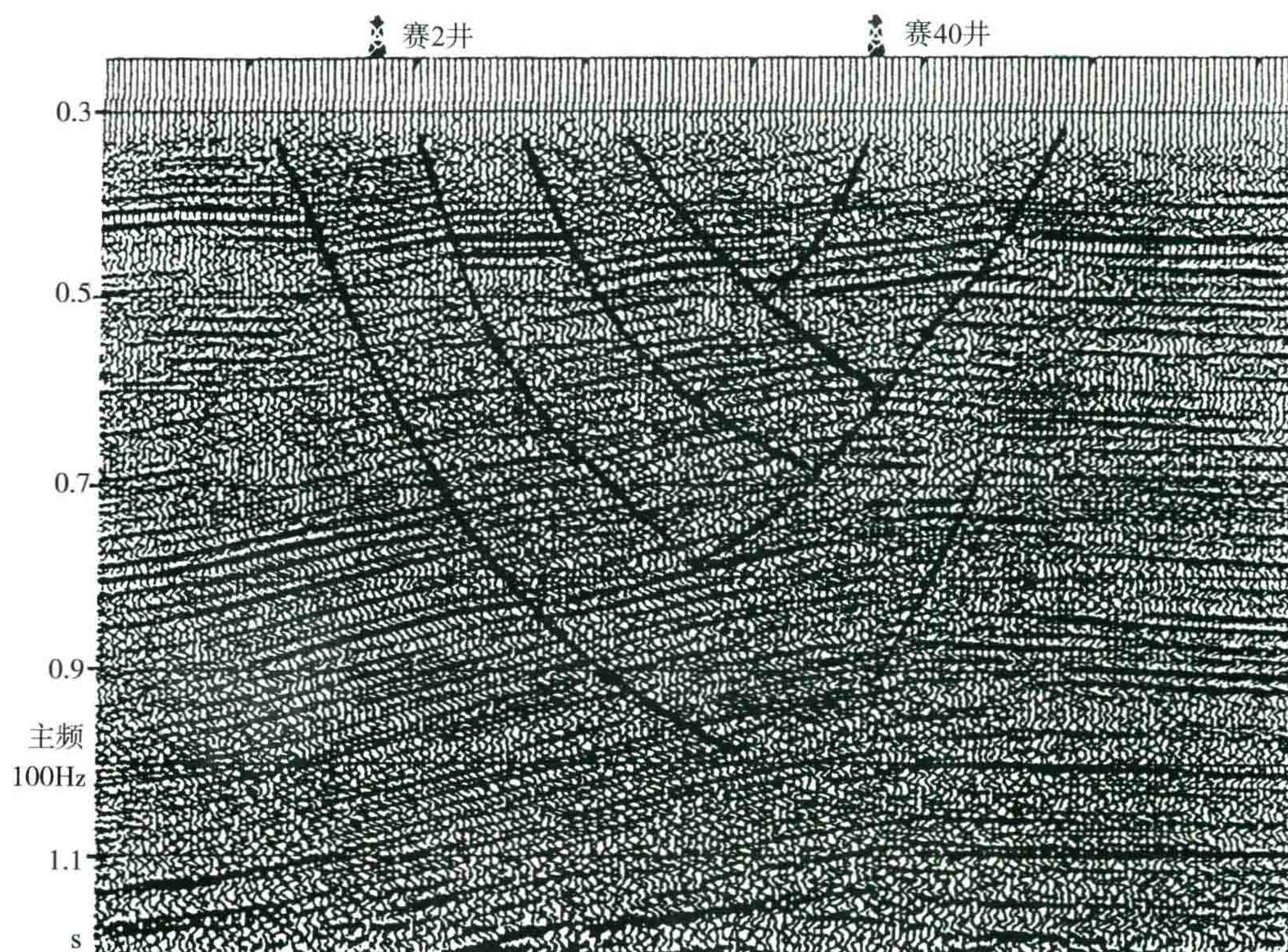


图 6　赛汗塔拉地区的高分辨率地震剖面

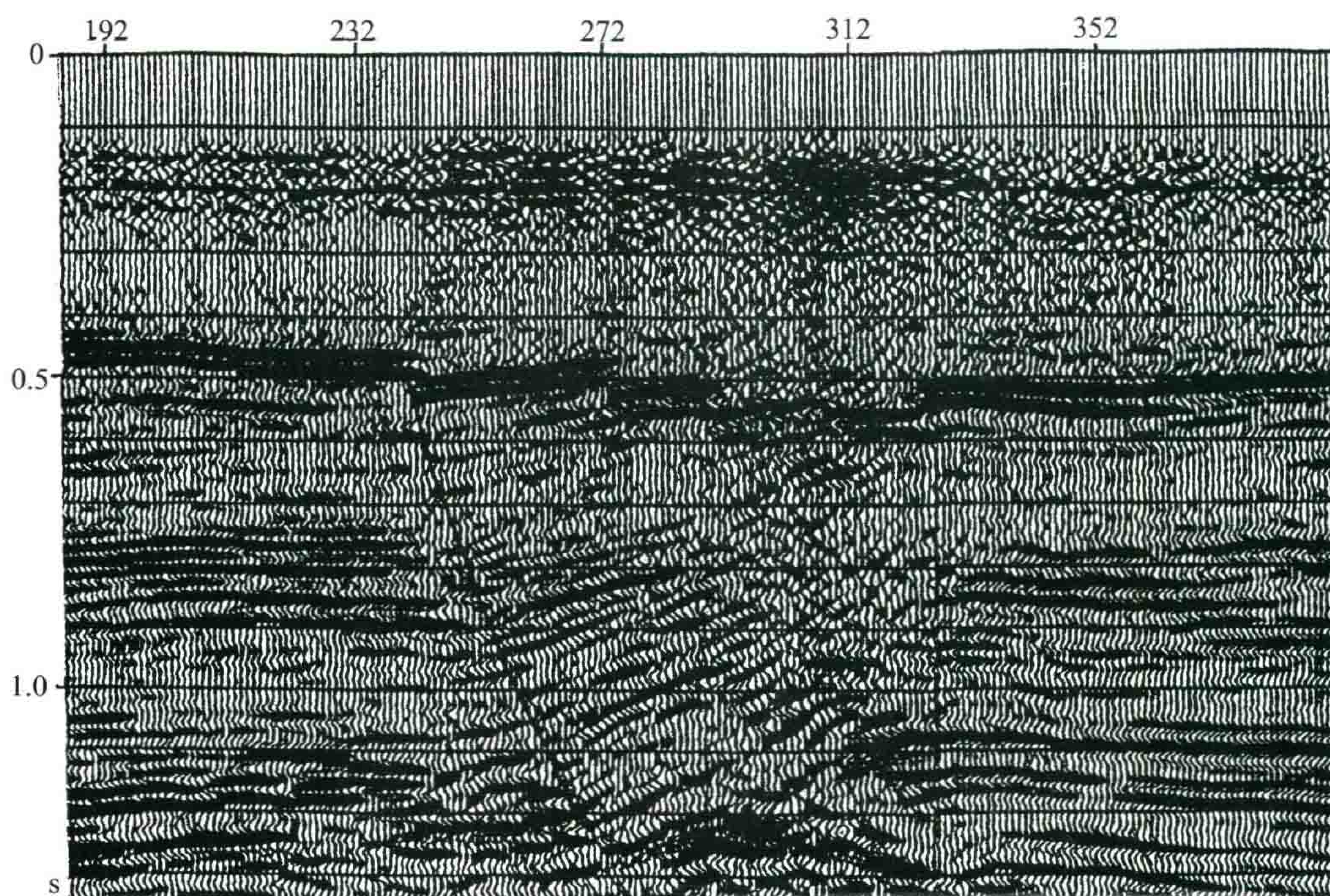


图 7　赛汗塔拉地区的常规水平叠加剖面

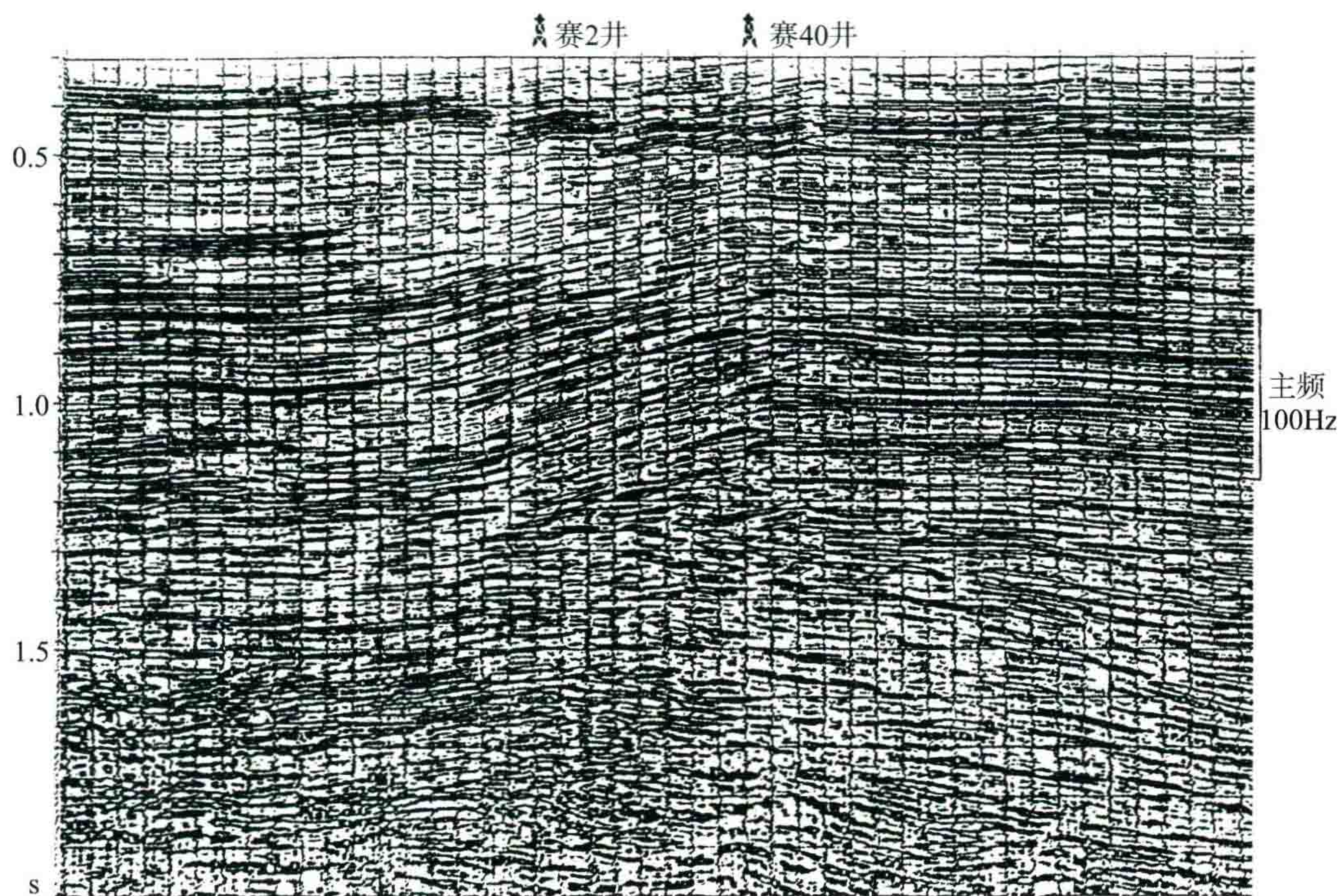


图 8 赛汗塔拉地区的高分辨率相对波阻抗剖面

这个例子使用的是 SK-5 型国产遥测地震仪，检波器是国产的 20DX 型 10 Hz 检波器，采用 36 个检波器的小面积斜方组合，组合总跨距仅 6 m。挖坑 20 cm，埋好覆土。使用井炮 18 m 井深，药量 3 kg。前置放大器增益 48 dB，加上了高频提升线路 $F_1=120$ Hz，陡度 12 dB/oct。采样率 1 ms，道间距为 25 m。施工中的主要措施：① 微震大的道要检查重埋，刮大风不能施工；② 采用分频回放，高频档不合格的要进行补炮。

在这次试验中，我们还进行了一系列点基础试验，并取得了认识上的提高。其中有些认识是在纠正了传统思路上的误区而取得的。因此，我认为有必要加以总结，并写出此文供大家讨论与参考。

二、高分辨率勘探中的主要误区

（一）从外国一家公司的疑问谈起

就是内蒙古地区这样一个比较成功的例子，石油地球物理勘探局把该资料送交美国一家对高分辨率处理有独到之处的小公司去处理（该公司便是展示海上极高分辨率剖面的那家公司）。他们的经理对我们的做法极不理解，提出如下一系列的疑问。① 为什么你们要使用 3kg 药量？这样的药量不利于提高分辨率。② 为什么要用组合检波？组合后高频成分将牺牲掉。③ 为什么你们要把前放低截频提高到120 Hz？这样将损失了120 Hz以下的有效信号，等等。他可能还不清楚我们使用的 SK-5 仪器只是 14 位浮点记录，否则他还会问："你们为什么不用先进的 24 位地震仪？"

由此看来，本文所讨论的一系列"误区"，还是当前国内外地球物理界所共同关注的问题，对此有必要加以澄清。

（二）"唯武器论"妨碍我们前进

不少同志问我："搞高分辨率地震勘探要用哪种地震仪？哪种检波器最好？"在他们的心目中，只要仪器好，加上"四小、三高"的措施，就能得到高分辨率的成果来。我告诉他们："目前，对陆上的石油勘探来

说，矛盾已经转化了。主要矛盾是风吹草动引起的高频微震干扰太强，大大超过了中、深层反射的高频信号电平。因此，追求好的24位A/D地震仪或好的高频检波器已经没有实际意义了。因为矛盾已经不是瞬时动态范围不够的问题，而是记录下来的高频全是干扰波，这才是最严重的问题。"

我曾经看过几个陆上油田所作的高分辨率资料，有的还不如不搞高分辨率的好。究其原因，往往可以发现：① 施工的季节刚好在当地的刮风季节里；② 使用的炸药量太小(1 kg)。这种资料表面上看来，单张记录的"主频偏高"了，但高频干扰波非常强。经频率扫描后，在50～100 Hz频档上就看不到同相轴。这样的资料其处理结果肯定好不了。即便使劲地用去噪加反褶积，有意"拔高"分辨率，结果是产生严重的"蚯蚓化"，加上严重的"多相位"，搞了很多假东西出来。这应该引起我们的严重注意。

我认为陆上石油勘探中，野外施工中的问题很多：从检波器的埋置、炸药爆炸的质量控制，到高频微震的监测，存在着一系列有待调查研究和加以改进的地方。而这方面又恰恰是人们容易忽视的。所以我在文献[1]中说："如果野外施工中高频噪声大于高频信号，那么，任何仪器与检波器的改进都是白搭。""地震仪器(包括检波器)的任务只是'忠实地'记录下大地的振动波形，但仪器本身是不知道这个波形是信号还是噪声的。""所以，信噪比谱的低劣主要不怪仪器的好与坏，而主要是施工设计者和施工者的功与过。"我在这里强调，好的仪器设备固然重要，但精心施工更重要。

24位A/D地震仪器确实有不少优点：① 它的瞬时动态范围大，最大值可达到120 dB；② 它改善了非线性畸变。可以说它代表地震仪今后发展的主流。

然而我做了一个调查：在我们典型的野外记录上，2 s反射波的振幅在进入A/D入口处的中等炮检距上的强度为3～5 mV，于是24位A/D前面10个二进位数实际上记的都是零。此时，它的瞬时动态范围其实与普通浮点增益形式的14位模数转换是一样的。

24位A/D地震仪用于浅层勘探及找煤，的确能充分发挥其作用。可惜我们找石油的目的层埋藏一般较深，所以其优点往往体现不出来。前几年，HGS公司曾经在陆上做过一个严格的试验：他们把组合检波中的每一对检波器上下用钢片和螺丝夹紧，插在地里后，并将每一对检波器中的一个接到VISION(威俊)24位地震仪，另一个接到MDS—18遥测地震仪的14位浮点A/D去。这样，两种仪器的输入信号是完全相同的了。然后在野外放炮，得到对比记录及对比剖面，结果发现二者记录面貌基本一样。

我认为其原因就是对于在高频噪声没有压下去的陆上石油勘探来说，24位地震仪的优点根本体现不出来。因为此时主要矛盾已经不再是动态范围不够的问题，而是高频信噪比不够的问题了。

我国当前正盛行一股紧跟世界潮流的24位A/D地震仪器热。我希望石油单位不要迷信它。当然，由于一种舆论一经形成，大家的思想很难转变过来。例如近年来，"没有24位A/D仪器就不能参加施工投标"的做法正是唯武器论的体现。

那么有了24位A/D地震仪器，如何充分发挥其作用呢？我认为对于目的层在2.0 s以下的工区里，应该有意识地让1.0 s以前的浅层"溢出"(超调)(即采用最大的前放增益，并把检波器尽量串联起来，增加其电压值等手段)，使2 s时的反射波进入A/D的电压值上升到足够大。于是，动态范围才真正地被充分利用。溢出时，应该使波峰的振幅取定值(砍脑袋)。有的仪器，如YKZ-480地震仪无此功能，浅层产生放大器阻塞，波形拉直杠[图26(a)]，需加以改进；而物探局仪器总厂生产的SK系列地震仪已经较好地解决了这个问题。

(三) 什么是好的地震记录

迄今为止，不少人还是根据野外监视记录评价记录的好坏："同相轴多便是好记录"，"主频偏高便是好"，"面波不见了就是好"。这类传统的好坏判断方法有时是错误的。尤其是在做井深、药量、检波器对比等试验时，这样的结论会贻误整个野外工期的施工质量。

我们说，地震勘探发展到今天这一步，人们已经逐步认识到，地震记录的好与坏的唯一标准只能是"信噪比谱"的好坏[1]。所谓信噪比谱是指在频率域里每个频率成分中信、噪各占多少百分比。要争取一个好

的分辨率的实质，就是要在信噪比谱里面争取一个较宽的"有效频带"。所谓有效频带就是信噪比大于1的那些频带。有效频带愈宽，才是真的分辨率高。

"分频扫描"是检查信噪比谱的最好办法。它能直观地判断信号与噪声在全频谱的分布特点(凡能见到同相轴影子的，就是其信噪比大于1)。该方法一般以大致一个倍频程左右的带通滤波器，从低频一直扫描到高频，分析信号与噪声在不同频档里的表现。对于良好的海上地震资料，往往一直扫描到150～300 Hz频档上，仍能见到中、深层反射波的同相轴影子。而陆上野外资料往往扫描到60～120 Hz就一片混乱。

最近，有些地震队试用以高频档扫描到多少赫兹来评定记录的好坏，这是我们对记录好坏的认识上的提高，值得推广。

频率扫描中的另一个误区是"频域泄漏"，它是由滤波算子不够长或滤波陡度太小所引起。例如，采用100～200 Hz频档作滤波，记录上出现低于100 Hz的反射同相轴，这便是泄漏。这种现象容易使人得出错误的结论，以为高频信号已经到达100 Hz以上。解决这个问题的办法是适当的增长算子，或者干脆在频率域作滤波。

至于不同队、不同地区的频率扫描的好坏比较标准不太容易制定。因为扫描的门大小、陡度、算子长度都无法统一。我建议今后不管采用什么样的滤波方法，一律以频扫的实际记录上的"视频率"能扫描到多高作为凭证，并规定大多数的主要同相轴的连续振动相位不得多于3个(即滤波门不要开得太小，一般以一个倍频程为好)。

(四) 频率扫描中的不公平竞争问题

在推广频率扫描过程中，发现有一个误区，那就是不同的高频提升作用在频扫中的"不公平竞争"问题。

一张地震记录的信噪比谱是客观存在的，并不因为人们是否提升高频而改变。但是调查这个信噪比谱，必须在频域中开一道门。如果把门开得很窄(甚至用单频)，那么分频滤波后出现一片连续振动，无从判断信号与噪声。如果门开得很宽也不行。所以笔者认为大致采用一个倍频程较为合适(一个倍频程的滤波算子大致为1.5个相位的连续振动，一个主峰很突出)。

然而实际上，在一个倍频程的门里，由于门里的振幅谱并非一样强弱，而高频部分的信噪比往往较差。所以在同样的80～160 Hz的频档上，凡是采用"突出高频"的措施，例如，前放F_1＝120 Hz或检波器F_0＝100 Hz，所得的记录总是比突出低频的记录来得难看(因为在100 Hz以上的噪声将明显地表现出来)。

笔者曾采用严格的同一排列、同一炮、同一种仪器的两种F_1(即12 Hz及120 Hz)以并联方式、同时输入半个排列作对比，证实了这一点。两种F_1的放大器，它们严格接收同一张野外记录，但分频扫描后F_1＝120 Hz的就"吃亏"大了。其实他们的信噪比谱是严格相同的。

由此我联想到河南、大庆、江汉等油田对前放F_1及检波器F_0的试验结论，过去他们一直认为F_1以30～40 Hz为好，F_0以28～40 Hz为好。这种说法其实又是一个误区。虽然他们也使用了分频扫描，但由于环境噪声仍然较强，所以这种分频扫描的评比是不公平的竞争。

我尝试过先作反褶积或谱白化，然后再作频扫。这样在每个门里高低频已大致拉平，就有可对比性了。但是这样做也往往是提升高频的吃亏。于是我把小门里的振幅谱人为地改成1，只用其相位谱(我称之"换谱法")再作反傅氏变换，这样，频率扫描结果就比较公平了。

鉴于上述，今后不要再在野外试验F_1与F_0这种得不偿失的方法。我建议采用后面要介绍的论证方法。

(五) 检波器埋置方面的误区

不少油田试验了深埋检波器的施工方案。一般说来检波器埋得深些自然有好处：① 远离地表风吹草

动的干扰源，干扰强度减小；② 避开地表低速带严重吸收区，高频反射信号增强。但实践中我们发现当浅孔深度大于 0.5 m 时，井底里是否有浮土(或砾石)就很难看见了。此时如果将检波器插在井中的浮土或砾石上，其微震仍然十分严重，甚至比插在地表的还坏得多。因此，“井中最后一锹土要捞出来”这句话十分重要。否则名为深埋，以为很好，实际上更坏。在潜水面较浅(2～3 m)的地区，挖 0.5 m 的坑，用手到坑中把最后的浮土取出来再埋，效果就很好。其他工区则以挖 20 cm 的浅坑较为简便。

此外应注意把挖坑时挖出来的土(尤其是松沙土)，甩到下风方向较远处去。否则风一刮，刚好刮到坑中，打在检波器上，又会造成很强的干扰。我们在内蒙古施工中坚持的一招就是放炮前，如果看到有微震大的道，必须进行检查、重埋。

(六) 组合检波是否压制了高频

深埋检波器必然给组合检波带来麻烦。不少人以此为由反对搞组合，甚至还有人说：“搞高分辨率勘探，就压根不应该搞组合。”我看对这个问题要作具体分析。第一，要搞清组合的必要性，可采用“密点小排列”的试验加以验证。例如，把一个 120 道排列改成 12 组×10 道，每道只用一个检波器，每组内 10 道的道间距缩成 0.5 m，组距为 50～100 m。那么放炮后，若每组 10 道的波形都一致，就说明没有再组合的必要了。若 10 道之间波形有明显的不一致(尤其是高频回放档上)，那就说明需要组合。第二，要认识到石油勘探与工程地震不一样。对工程地震来说，要求达到极高的频率，所以很小的组合跨距对高频就是致命的。而在石油勘探中，一般 5 m 的组合跨距并不造成对 250 Hz 反射信号的压制(因为有效波视速度一般恒大于 2500 m/s)。

图 9 是 5 m 组合基距(总跨距)的频率特性图，从中可以看出，250 Hz 的高频信号一般并不受太大的压制，小跨距组合的效果总是比不组合的好。当跨距等于一个干扰波视波长时，效果最好。但是，面积组合在施工中必须强调把每个检波器精心埋好。

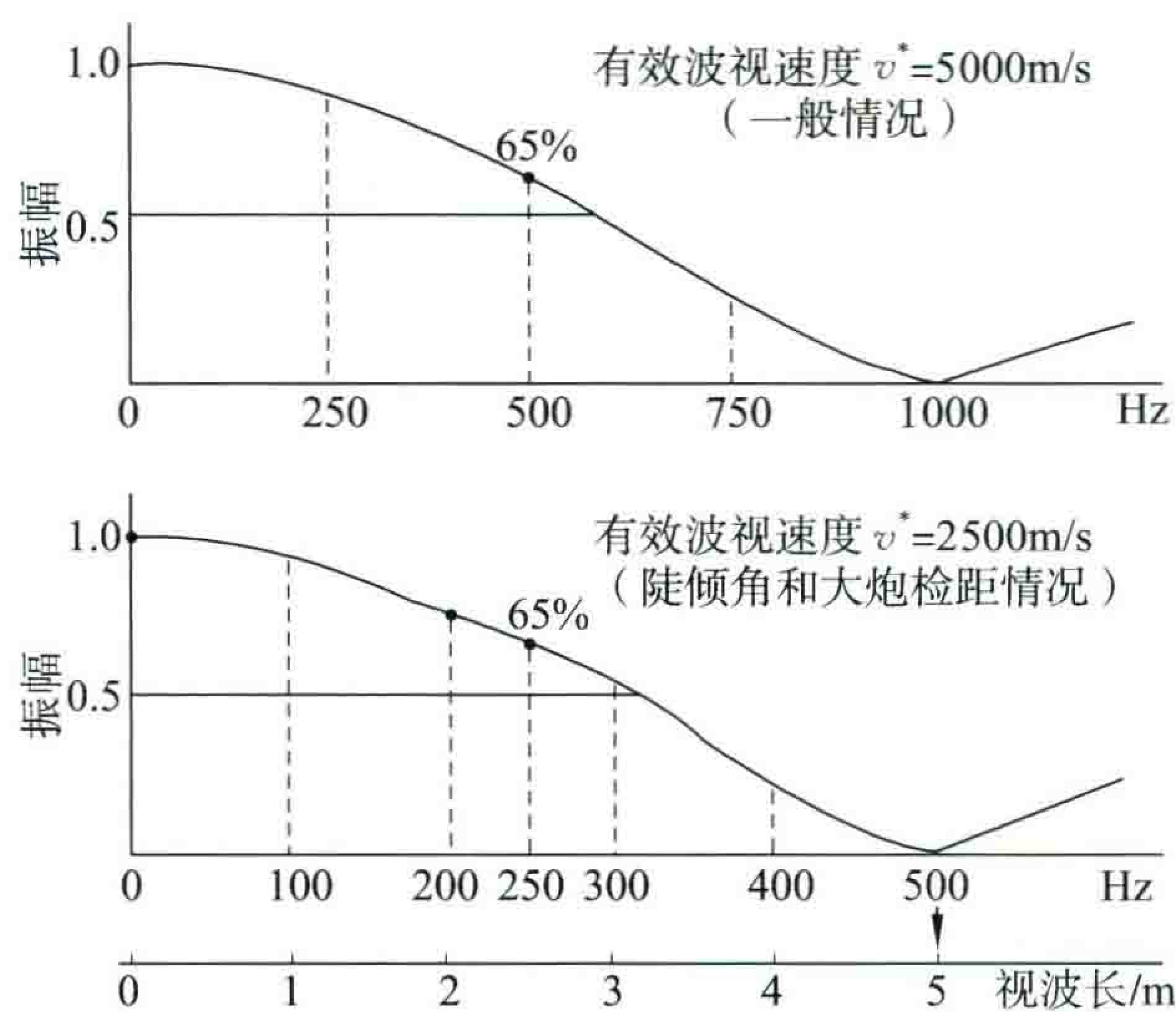


图 9　5 m 组合基距(总跨距)的频率特性

(七) 高分辨率勘探不一定非用小药量

从理论上说，炸药量愈小，其激发出来的高频成分愈丰富，即主频 F 与药量 Q 的立方根成反比。因此，似乎药量愈小愈好，其实这是一个误区。我在 1993 年出版的《走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析》一书(第一次印刷)中也根据传统的概念作出了错误的判断：以为石油勘探的药量以 1 kg为好。俞寿朋先生在他的专著中做了更深入的研究[3]。他认为虽然加大了药量后，爆炸脉冲的主频向低频移动，但是高频处的能量绝对值仍是增加的，不过增加得少而已。例如，炸药量增加 8 倍后，低频 20～40 Hz 处振幅增加 4～6 倍，而 100 Hz 以上的高频振幅只增加 1 倍左右(图 10)。因此，我在《走向精确

勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析》一书的第二次印刷中已经纠正了对药量的错误提法。

我已经看到了不少在石油勘探的高分辨率施工中，由于炸药量太小而失败的例子。这个误区应该立即加以纠正了。实际上提高炸药激发能量对中深层反射尤为重要，而且有一系列值得研究的课题。然而目前野外施工中的问题却无人研究。1993 年在野外试验中发现以下问题。

(1) 炸药保管不好，导致受潮、结块、拒爆，或爆炸不完全，出力不够。

(2) 雷管放在药包之外，与炸药分离，泡在泥浆中，雷管爆后炸药常常不爆。

(3) 雷管的起爆时间误差经常达到±2 ms。

(4) 尤其是最近不少野外队施工中，采用 2 kg 药量，并把雷管放在两柱 1 kg 药包的中间激发。这样爆炸后，能量分布的方向特性很差，分散到四面八方，只有利于产生地面干扰波，而不利于能量向下传播以加强有效波。1994 年我们纠正了塔里木盆地施工中的这种做法后，记录质量得到明显的提高。

最近几年，在药量相对减少的情况下，野外施工在爆炸激发这个环节上，已经出现了严重的缺陷。不少高分辨率施工测线的单炮记录，用固定增益显示后，发现：① 相邻炮之间的能量(振幅)差别可以达到 10 倍；② 相邻炮的同一反射层的主频可以差到 1～2 倍。

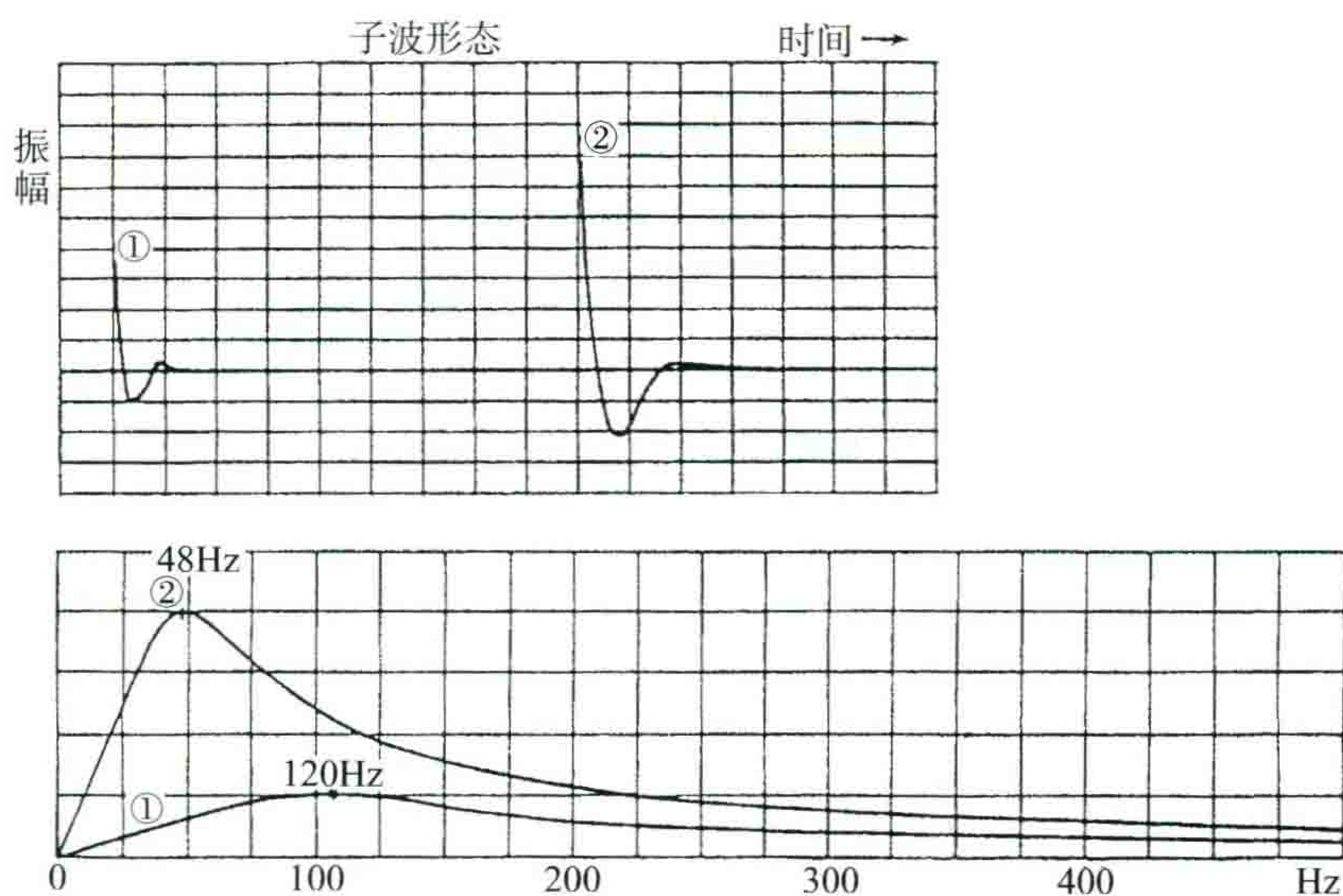


图 10 炸药震源激发的子波及其振幅谱

子波①和子波②的药量为 1∶8

我认为现在需要呼吁大家来改进我们的激发条件了，要有专人研究，否则高分辨率勘探难以取得很好的效果。

降低环境噪声，在风小的时间里施工，这终究是比较消极的办法。而积极的办法是增强地下反射波的能量，减少由爆炸产生的各种地表干扰波，这才是积极的、进攻性的措施。这亟待我们进行深入的研究。

(八) 为什么野外记录主频很高而处理结果与以往差不多

不少人遇到过这样的问题。这里面除了处理的方法中还存在着不少误区之外，也存在认识的问题。例如，有人看到采用了高频检波器或涡流检波器之后，面波基本上看不见就以为面波被克服了。其实这样的资料只要在室内通过低频档 AGC 回放，面波又会赫然呈现出来。有人使用 $F_1=40$ Hz 的前放，看到野外监视记录上高频干扰并不严重，就放松了对高频干扰的监控，结果也会很糟。

我们说：不同的检波器和不同的地震仪器接收地下的反射信号，都相当于将大地的原始振动作一种褶积滤波。因此，所记录的各种频率的信号，只要不到达"死亡线"(−60 dB)以下，那么，不论何种仪器、何种检波器所记录的信号，通过反褶积处理或谱白化，都将变成面貌基本一样的资料。这句话并非出语惊人，而是逻辑的推理和实践的结果，我通过理论模型证明了这一点。那么，为什么−60 dB 是信号的死亡线呢？

理由有三。

(1) 受模数转换的 14 位浮点条件的限制，或者 24 位定点的中、深层前面都是零的限制，只要高、低频相对振幅相差 1000 倍以上，弱信号就很难记录下来。即使到室内也无法恢复它。

(2) 反褶积及谱白化模块中的常用白噪系数为 0.1%～1%，因此低于 1000 倍的频率成分就不能再提起来。

(3) 各种数字滤波的算子不可能为无限长，因此各种滤波算子总存在一些“频域泄漏”。一般在通放带之外，总还存在千分之几的泄漏。所以即使把 1/1000 的高频弱信号放大 1000 倍，低频强信号也会同时放大若干倍，还是后者压倒前者。

出于这些考虑，我想在野外记录中追求很大的动态范围(例如 24 位 A/D 最大可达 120 dB)，实际上在处理中，还是很难将 −120 dB 的弱信号再恢复出来。所以我坚持说：在野外记录中必须采用高频提升，“使模数转换之前你所想要的高低频的能量的差别能够装在 60 dB 的范围之中”，这才是比较明智、稳妥的办法。

(九) 什么样的试验不值得做

不少油田花几百万元买了不同的检波器到野外作对比试验。他们向我展示在同一个排列上，用不同检波器所得的频率扫描对比记录，要我评判哪一种检波器好。其实这些试验记录是不同炮次所获得的，而且每种检波器的埋置方法又不同。从现象上来说，埋深 1 m 的 100 Hz 检波器结果最差，高频微震最大。我告诉他们，这样的结果并不说明检波器的好坏，只能说明施工质量的好坏。

1993 年，曾经有人组织不同的地震仪器到库车以南的一个固定的排列上去作仪器对比试验。组织者只规定了排列位置，却不统一施工日期和施工方式(检波器类型不同。)[4] 这样的试验其实没有可对比性，例如施工的那一天，刚好风大、干扰大，那么这项试验结果就好不了。当时通过这些试验，得到的结论是 SYSTEM-2 最好，国产 SK-4 仪器最差。我认为这个结论不见得对，国产仪器再差，最多动态范围小一些，高频性能差一些，也不至于造成中频档上的“断点模糊”。实际上，这项试验也只能说明施工质量的差别。

现在还有人持有这样的观点，即“衡量不同仪器好坏的最客观标准是不经任何加工的统一叠加速度的初叠剖面”，他们称之为 B 叠加。其实初叠剖面和监视记录一样，也仅仅是一种“视觉信噪比”和“视觉分辨率”，愈是突出高频(例如用较高的 F_1 或使用 F_0 较高的高频检波器)，剖面上的高频干扰就愈强。

我认为不论是对比仪器，还是对比检波器，必须严格地保持施工条件单一，才能保证试验结果的可对比性。然而仪器的好与坏，其实完全可以用它本身的测试技术指标来说明问题，不必到野外去比较(除非你想考验仪器的稳定性)。

目前我的这些认识看来还很难说服某些人。有一次我参加一个仪器鉴定会，在鉴定书上写着：“该仪器所获得之资料有很好的信噪比和较高的分辨率”等等。其实这些话是没有太多的道理。事到今日，仪器的技术指标已经大大超过了施工条件的要求，分辨率与信噪比的好坏主要由施工工区及施工条件所决定，而与仪器的差别很少有关系。即使采用很高级的仪器到困难的工区去工作，若不严格施工，也绝不会得到一条高分辨率剖面来。所以，我主张今后应该采用比较严格而科学的室内技术论证方法对施工因素加以论证。

三、高分辨率施工因素的技术论证方法

我推荐用下述四条曲线进行室内的论证：① 检波器 F_0 的频率特性曲线；② 前置放大低截频 F_1 的特性曲线；③ 前放高截频(或去假频滤波器)F_2 的特性曲线；④ 目的层 T_0 深度上的大地吸收特性曲线 G(图 11)。当采样率为 1 ms 时，折叠频率为 500 Hz，地震仪器的去假频滤波的截频一般高于 300 Hz。此时对中、深层勘探 F_2 曲线可以不加分析，只需分析 3 条曲线。

在纵坐标为分贝数，横坐标为频率的图中，G 为一直线，它需要通过理论计算获得。其他两条曲线都可以根据截频处为－3 dB，截频外根据陡度分贝数，按倍频程直接绘出它们的曲线来。如图 11 中 F_1＝150 Hz，陡度 18 dB/oct，于是在 150 Hz 处绘－3 dB；再在 75 Hz 处向下增加 18 dB，即－21 dB；在 37.5 Hz 处又增加 18 dB，变成－39 dB；……当然，如果有实测 F_0 及 F_1 的频率特性曲线，最好使用实测的数据。然后将此三条曲线的纵坐标分贝数相加（频域中褶积便是振幅谱相乘，也就是分贝数相加），得到三条曲线的总结果，即图 11 中的 H 曲线。

首先，从这条 H 曲线的顶部形态可以看出：在这种情况下最终突出的频率成分是 43 Hz，然后，再从 H 曲线的顶点开始，向下划一条－60 dB 的水平线，即是“新的死亡线”，再分析它和 H 曲线的左右两个交点，就可以确定在无噪声的条件下所接收的目的层的最大频宽。这便是对“可记录性”的论证方法。

在图 11 中，表示了仪器采集因素设计的第一方案，即笔者推荐的方案：

反射目的层深度 T_0＝2.0 s；

检波器自振周期 F_0＝40 Hz 的特性曲线①；

采用前放低截频 F_1＝150 Hz、陡度为 18 dB/oct 的特性曲线②；

大地吸收指数 G＝－0.76 dB/Hz 的特性曲线③。

这样，把①、②、③三条曲线的纵坐标分贝数相加，就可得到特性曲线④。它的顶点在 43 Hz 处（已下降－69 dB），从此顶点再向下量－60 dB，就是新的信号死亡线，它和 H 曲线两侧相交于 7.5 Hz 及 168 Hz。此即综合后的瞬时有效动态范围所允许记录的频率范围。

由于顶点位置太低，电压不足，建议在滤波级中补偿顶点的下降量（即增加放大增益 30～40 dB，并且将检波器串联，增加炸药量）。1993 年，我们在内蒙古施工就是在 SK-5 仪器的低截滤波的节间加一个放大级线路，这是很容易实现的。

在图 12 中，还表示了其他三种方案的对比。

第二方案：采用前放低截滤波 F_1＝60 Hz、陡度为 18 dB/oct（这是当前有些高分辨率地震队所使用的）。检波器仍用 F_0＝40 Hz，将曲线①、②、③相加，得综合曲线⑤，其顶点在 41 Hz（下移 46 dB），综合后的可记录频率范围为 6.5～140 Hz。

第三方案：采用 SN388 仪器，它已取消了低截滤波（或者使用其他地震仪，而用很低的低截频，例如 8～12 Hz），检波器仍用 F_0＝40 Hz。将图中曲线①与直线③相加，得曲线④，其顶点在 16 Hz（下降－28 dB）。再向下量－60 dB，为综合后死亡线⑥，它和曲线④的两侧相交于 1 Hz 及 115 Hz。

第四方案：常规采集，所用自振频率等于 10 Hz 的常规检波器，使用 SN388 地震仪（24 位 A/D，没有低截滤波）。其结果是将曲线⑧与曲线③相加，得曲线⑨，顶点在 9 Hz 附近。从此顶点下移 60 dB 即得新的死亡线（在－70 dB）。低频端相交于 0.5 Hz，高频端相交于 92 Hz。

总结以上四种方案，高低频可记录频带范围可归结为表 1。

表 1　仪器采集因素设计方案的对比（反射目的层深度 T_0＝2 s）

设计方案	检波器 F_0	前放低截频 F_1	实际通放范围	附注
第一方案	40 Hz	150 Hz，陡度 18 dB/oct	7.5～168 Hz	建议采用
第二方案	40 Hz	60 Hz，陡度 18 dB/odt	6.5～140 Hz	差
第三方案	40 Hz	SN388，不用 F_1，24 位 A/D	1～115 Hz	更差
第四方案	10 Hz	SN388，不用 F_1，24 位 A/D	0.5～92 Hz	常规，最差

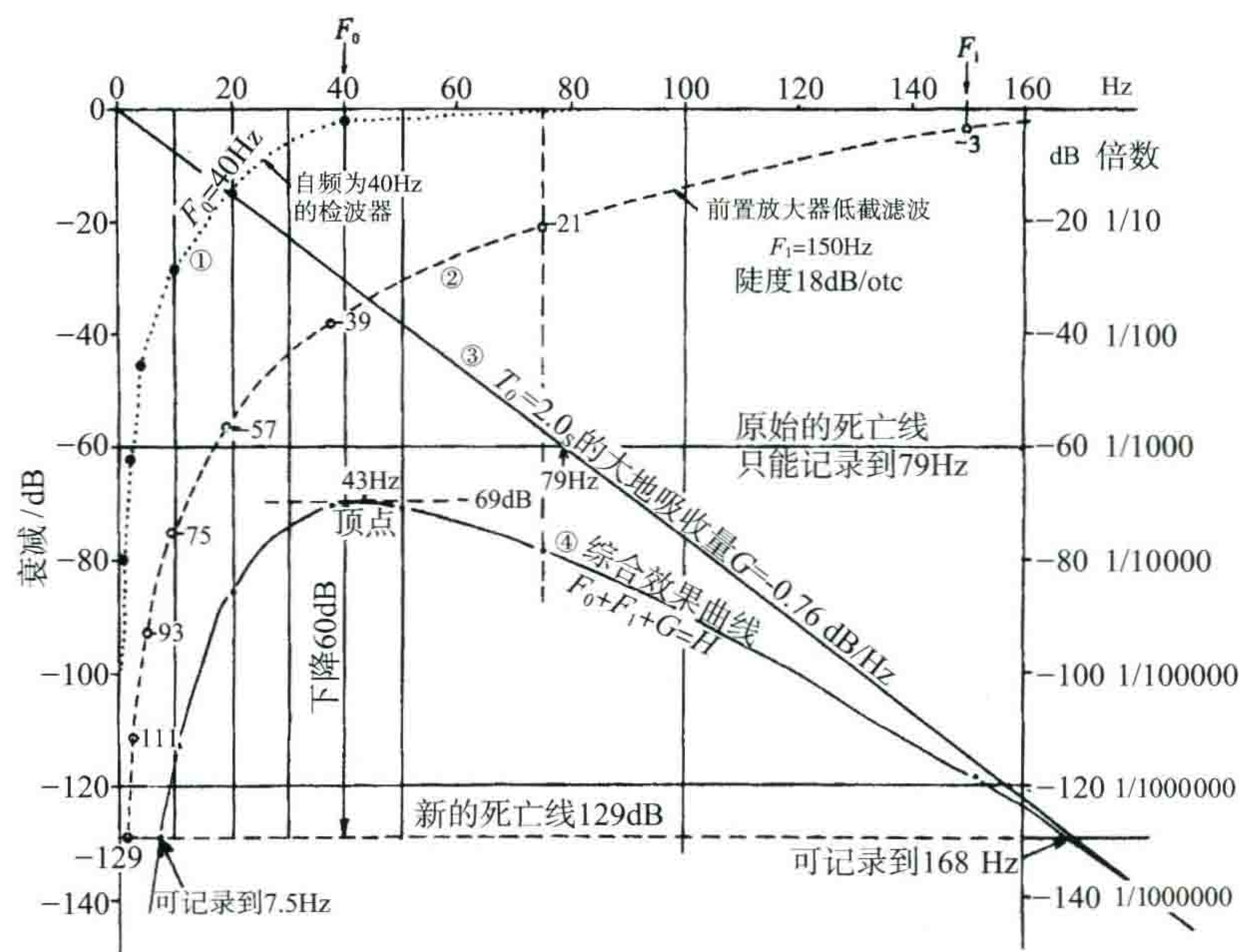


图 11 对仪器采集因素的综合动态范围分析为笔者推荐的第一方案

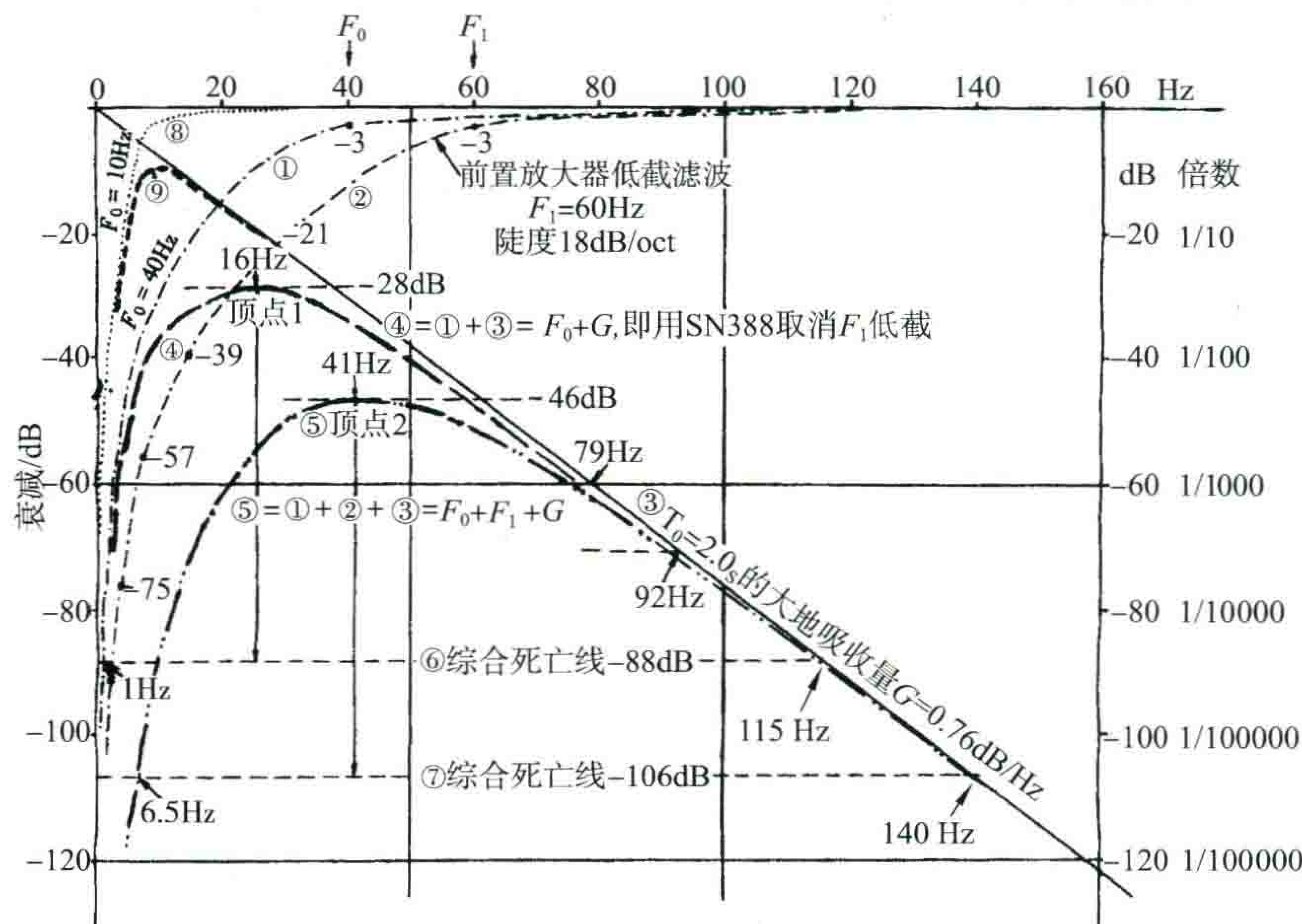


图 12 其他三种仪器采集因素设计方案的对比

由此可见，SN388 仪器取消 F_1 的做法对高分辨率石油勘探是不利的。有人说 SN388 去掉 F_1 后的优点是失真度小，谐波时变只有 0.0003%。我说追求这样高明的失真度其实没有实际意义，因为检波器插在地上，其失真度就大大超过了这个数字。最近有人列举了低频面波所产生的谐波会影响高频信号的可记录性。我认为他们的考虑是不实际的，在 30Hz 以上的分频扫描档上从来没见过面波的高次谐波会干扰有效波。所以，在地震仪中取消 F_1 是不明智的作法。

从表 1 可以看到采集中将高频提升的重要性，并且可以进一步理解“截频”的作用，而实际上低频信号并没有被截止。从电工学里搬来的“截止频率”这个名词的含义需要修正，我们正是利用 F_1 的截频压制作用来提升高频的，所以我的口号是“把截频当通频用”。目前大多数油田把 F_1 只提高到 40 Hz，这是远远不够的（因为它对 40 Hz 以上没有任何提升作用），只起了抑制面波的作用。我认为搞高分辨率勘探一般 F_1 至少要提高到 120～160 Hz 才起作用，但陡度不要太大，一般以 12～18 dB/oct 为宜，否则便要压制低频有效波。

这样做后，野外监视记录可能面貌差一些，有些人可能又要动摇而进入误区。须知可记录性和信噪比

谱是两个不同的概念。

四、怎样才能获得高分辨率

怎样才能获得地震勘探的高分辨率，这个问题不是三言两语可以说清楚的。因为高分辨率地震勘探是一个系统工程，从采集到处理、到解释存在着一系列的新课题，需要各方面进行试验攻关才能奏效。

最近东部地区不少油田在技术准备还不充分的情况下，大规模地上队伍，搞高分辨率地震勘探，这是我所不赞成的。他们以为只要有动态范围最大的 24 位 A/D 的数字地震仪、高频检波器，加上“三高、四小”，就想当然可以获得高分辨率。其实不然，还需要作一系列的调查研究和系统分析。下面介绍我的调查研究结果。最近两三年里，我对当前地震记录上的信号与噪声的实际情况作了些调查，经过归纳，绘成一张“信噪相对态势图”（图 13）。

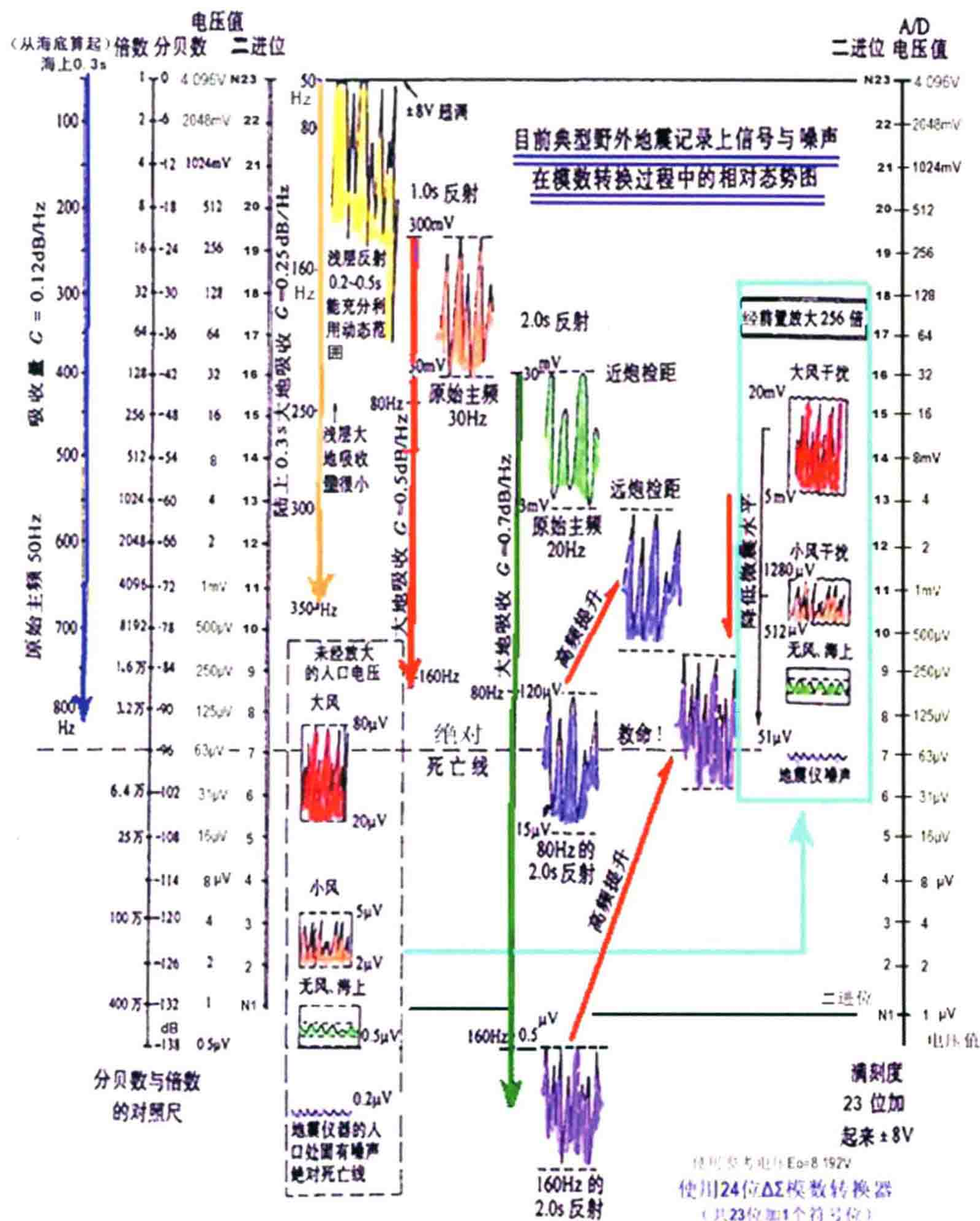


图 13　目前典型野外地震记录上信号和噪声在模数转换过程中的相对态势图

此图的纵坐标是24位模数转换器的电压值或二进位数(见图的右侧)。Δ-Σ技术的24位,A/D的最高位是4 V,最低位是0.5 μV(满刻度24位,为±8 V),这是固定不变的。我在图的左方加绘了分贝数与倍数的对照尺。可以看出,若以顶上第24位当0 dB,则最下面一位便是-138 dB,即八百万分之一。这是一个相当大的量程。

(一)噪声的强度分布

现在从图13左侧的虚线长方形框开始说起,方框最下面标的0.2 μV是地震仪器换算至入口处的固有噪声,我称之为信号的"绝对死亡线"。它是地震仪器各电子元件(主要是前置放大器)的"热噪声"——是不可克服的一种噪声。也就是说,即使把仪器入口处短路,无信号输入,仪器也会有白噪声输出,其强度换算到入口处为0.2 μV。因此,在入口处低于0.2 μV的地震信号,不可能被现有的地震仪器记录下来(只有DFS-V仪器的入口噪声最小,为0.1 μV)。

方框内有3幅小图是典型野外施工中的高频微震干扰电平,主要由刮风引起,频率范围约70~250 Hz。一般刮大风时噪声强度可达到20~80 μV,小风时为2~5 μV,无风时(或海水中接收时)为0.5~1 μV。这些电压值都是指进入地震仪入口处的电压。

信号进入地震仪后先由前置放大器对它进行一次放大。这次放大采用由用户选择的几个档,称为"固定增益"。一般仪器配有24 dB(16倍)、36 dB(64倍)及48 dB(256倍)3个档。野外通常采用48 dB固定增益,即放大256倍以后再进入模数转换器。所以,我把方框中的内容向上移动48 dB,绘到图13的右侧。其中,51 μV处便是反映地震仪器固有噪声的绝对死亡线。由此可见,目前24位A/D地震仪的最下面的7、8位实际上是"无效位数"。从此图还可以看到:刮大风时,微震干扰电平可以高达第16位,即20 mV左右,它的上方的有效位数只剩下8位了。

(二)反射信号的强度

下面分析反射信号的强度分布情况。

图13左上角是0.2~0.5 s到达的浅层反射的强度,此图表示了不同地区常规生产中多张记录的统计反射强度的分布。小图中示意地表示出浅层反射的波形,顶上方头部分是溢出(8 V)的波形。此时24位A/D中数字记到顶,充分利用了24位A/D的动态范围。

野外记录上浅层反射的原始记录主频约50 Hz左右。对这个波形的高频成分的强度如何分析呢?我采用文献2中有关大地对高频吸收的经验数据加以推算。

在我国东部的新生界盆地中,陆上0.3 s反射的大地吸收衰减指数约为$G=-0.25$ dB/Hz。于是对于高频250 Hz的信号来说,它比主频50 Hz高200 Hz,其强度为200×0.25=50 dB,所以250 Hz高频信号的强度应绘在从顶上往下-50 dB之处,即电压值为16 mV之处。同理,我们用粗线绘出80、160……直到350 Hz的一条竖线。显然,由于浅层大地吸收量很小,400 Hz也还在死亡线之上,所以,只要在风很小时施工,就很容易获得最高频率达400 Hz左右的记录。

第二纵列是1 s到达的反射波的情况。统计了不同地区的反射真振幅,在模数转换器中的电压值(真振幅值)为30~300 mV。原始主频约30 Hz,此时大地吸收指数为$G=-0.5$ dB/Hz。我在一条粗竖线上标出了它的高频分量80及160 Hz位置,可见160 Hz已经快到达死亡线了。所以在风和日丽的天气里,能够把160 Hz记录下来;刮大风时,只能记录下80 Hz的高频信号。

第三纵列是2 s到达的反射波的情况。此时反射波峰的电压值在近炮检距处约为30 mV,而远炮检距处仅3 mV左右。原始主频约为20 Hz,大地吸收衰减为$G=-0.7$ dB/Hz。因此80 Hz与160 Hz的高频成分的强度的上界分别移到120 μV及0.5 μV之处,我在此相应位置上示意地绘了两个高频信号的小图。显然,此时大于100 Hz的信号已经进到死亡线(51 μV)之下,不可能被记录下来。远炮检距的80 Hz信号也已不能保留下来,更不用说160 Hz的高频信号了,它已经深深地沉没在噪声里。这便是2 s的反射

波分辨率不能得到改善的根本原因。

这张态势图虽然是示意性质的，但是它给出目前高分辨率地震勘探的根本症结之所在。这里所分析的信号与噪声的态势都只是指在A/D记录过程中的情况，并不包括以后资料处理中信噪比提高的潜力。后者还能争取改善一些信噪比，挽救一部分高频信号，有关这种潜力的分析我将在下面加以讨论。

有人看到国外海上资料已经出现反射主频达到300～500 Hz的精彩剖面，于是对我们分辨率上不去感到十分沮丧。其实国外主频达到300 Hz以上的例子仅仅出现在海上的浅层反射的实例中。我在图13的最左侧绘了一条粗竖线，表示海上0.3 s反射的情况，其原始主频约为50 Hz。由于不存在低降速带的吸收，大地吸收指数减少为$G=-0.12$ dB/Hz，于是图中800 Hz的高频信号还在死亡线之上。此外，由于海水对反射纵波是基本不吸收的，如果海水深150 m，相当于有0.2 s是在海水中，所以0.3 s的反射其实只有0.1 s的吸收量。这种情况只要采样率达到0.25 ms，反射主频搞到1000 Hz以上，是轻而易举的。

而对于陆上来说，尤其是2 s及2 s以后的反射，大地吸收是严峻的事实，想要提高分辨率就需要付出极大的努力。

（三）分析态势图的结论

鉴于以上对噪声和反射信号强度分布的分析，我国陆上油田大部分反射波到达时间在1 s以上，有的甚至到2～3 s。今后提高分辨率的措施和方向是什么呢？还是让我们从态势图上作更深入的分析。

1. 2 s反射的实际有效动态范围到底有多少位

先分析一下地震仪器的潜力。目前大家比较迷信24位A/D地震仪，我以为它对浅层搞高分辨率极有价值，但对2 s以后的反射没有多大用处。试看图14，这是对2 s到达的反射波记录情况的分析。其左侧就是态势图上的24个二进位，其上标明用Δ-Σ技术的24位A/D的记录情况。从1～7位是仪器的固有噪声，是无效二进位(用符号×表示)。假定是刮小风的时候施工，那么8～11位被刮风干扰所占据，也是无效位(用符号一表示)。30 mV至3 mV为2s反射的实际强度，记在12～16位，仅5位有效(用符号V表示)。17位以上的8位全部记的是零(因为信号没有那么强)。

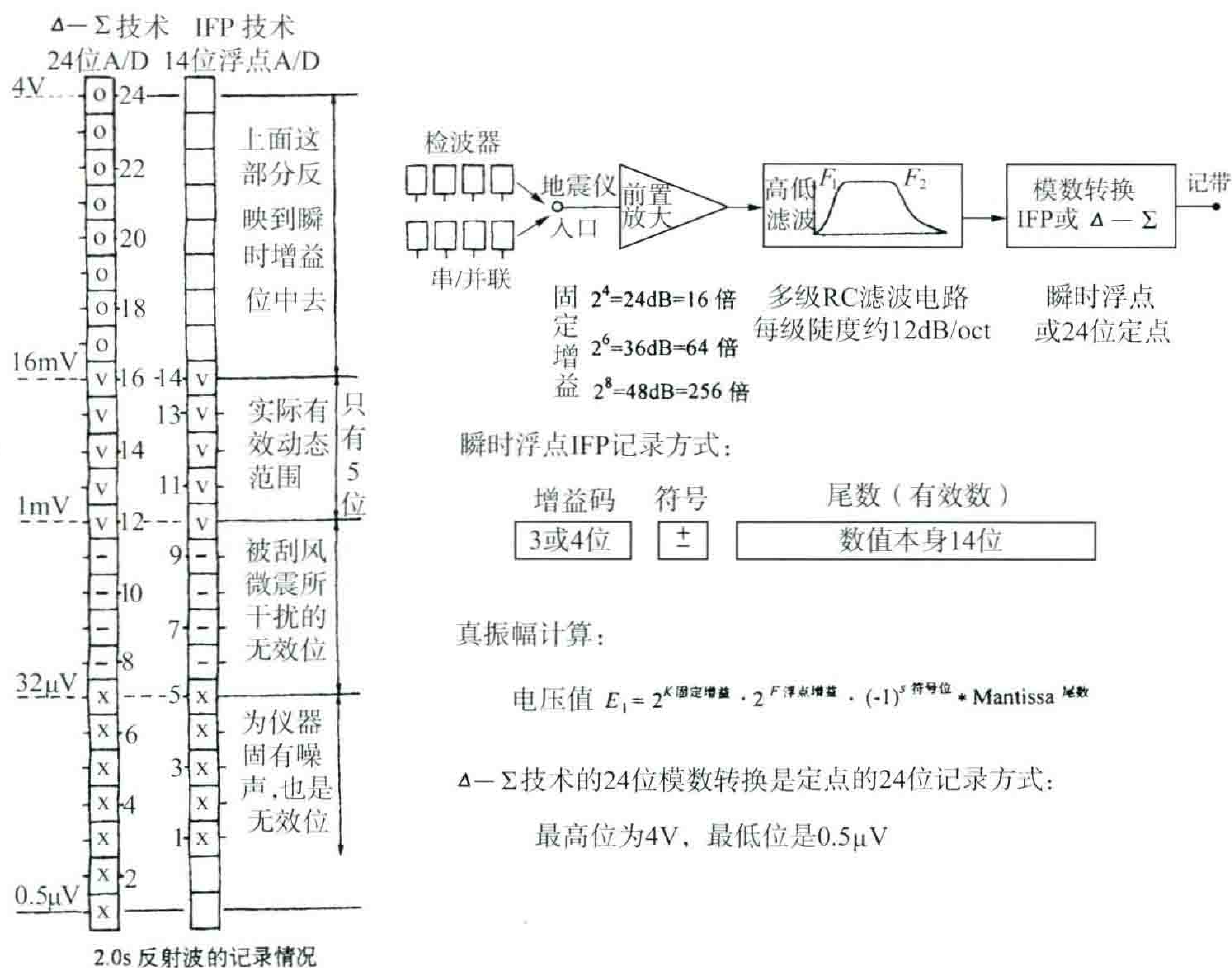


图14 24位Δ-Σ技术和瞬时浮点(IFP)技术的记录方式比较

再看图 14 左边第二列，它是 14 位瞬时浮点记录方式。它的 17 位以上的电压值已反映到瞬时浮点增益位中去了。从第 16 位上开始记它的尾数，往下记 14 位，下面空了 2 位。对比左右两种记录方式，可以看到实际上它们差别不大。虽然理论上 24 位 A/D 精度高，但对 2 s 反射的“实际有效动态范围”只有 5 位。所以不论什么方式记录已经差别不大了。我在这里再次指出：“迷信 24 位 A/D 地震仪，唯武器论是不对的。”

在此例中，显然最重要的事情是如何把被刮风干扰所占据的第 7～11 位争取夺回来，使它成为实际有效位。所以，野外认真施工比买新仪器重要得多。实际上对 2 s 以后的反射来说，14 位瞬时浮点的记录方式也已经足够好了。

2. 关于前放固定增益的选择

可能有人要想：既然仪器的入口噪声很难再降下来，那么，为什么要用 48 dB 的固定增益呢？把前放增益降为 24 dB，甚至不加放大，不就可以使 24 位 A/D 充分发挥其功能，死亡线不是大大下降了吗？这个问题并不那样简单。问题是目前放大 256 倍后的 2 s 反射强度仅为 3～30 mV。如果不放大，在仪器的入口处仅为 12～120 μV，也变小了。它与死亡线的相对态势是不会改变的，只是图幅相对下移而已，没有任何好处。

我认为前置放大增益倍数不但不应该降低，还应适量提高才好。因为经实际测试，地震仪的入口噪声水平当增益愈大时，固有噪声换算到入口处的水平是降低的。例如 DFS-V 仪器在固定增益 24 dB 时的入口噪声为 0.6 μV，而 48 dB 时入口噪声降为 0.1 μV。也就是放大倍数增大 16 倍时，换算到入口处的噪声要降低 6 倍。入口的噪声水平数值的降低对于进到入口处的弱反射信号恰恰是有利的。

3. 检波器的串联或增加其灵敏度

检波器的串联或增加每个检波器的灵敏度对我们也是有利的，因为它可以提高地震仪器入口处的电压。当然，“水涨船高”，刮风引起的高频微震也会随之而增高。因此，反射信号与干扰波一起在态势图上向上移动，相对态势还是不变。然而，检波器的串联还是可以相对地克服由大线进来的感应电压（如50 Hz 感应及天电干扰等）。

这里特别提一下，目前检波器的串、并联组合小线的内部结构，都是由 3 根电缆线组成。这种形式最容易受感应，应该改成 2 根线双扭，才能更好地克服感应（电磁场一正一反，刚好互相抵消）。今后每条小线内部最好都采用串联形式。

对高分辨率队来说，最好争取多加串联，从而增加中深层反射的入口电压值。

4. 关于振幅溢出

采用了较高的前放增益及增加检波器灵敏度之后，如果炸药药量再稍大，就容易发生浅层溢出，怎么办？我想，当我们的目的层位于 2 s 深度时，完全可以有意识地让 1.5 s 以前的浅层反射信号溢出（其实只是近炮检距部分的浅层信号溢出）。这并不影响整张记录的获得，但却争取到中、深层目的层的反射波得以记录得更精确。当然最好能够设计出放大倍数随 t_0 时间增大而自动增大的“程序增益控制线路”，才能从根本上改进溢出的发生。

以上提高前放增益及增加检波器灵敏度的两条措施是有好处的，但还不是关键的措施。因为它们只是使态势图中的小图往上整体移动而已，信号与噪声的相对态势没有变化。那么，怎样才能改变信号与噪声的相对态势呢？从根本上说就是要实现态势图（图 13）中的两个箭头方向。右方要实现降低微震水平，左方要实现高频信号的提升。例如，把淹没在死亡线之下的 160 Hz 的 2 s 信号从图上最低的位置拉到箭头所示的位置，即提到死亡线之上。

5. 降低高频微震干扰水平

降低高频微震干扰水平，是当前最重要的措施。目前有很多办法，例如：① 争取在不刮风或刮小风时施工；② 用洛阳铲挖坑把检波器埋到地面以下；③ 利用炮井深埋检波器，或者干脆使用一次性的压电检波

器，不再回收，等等。其中第一种办法最重要，要在野外排列上随时监视微震干扰的水平，并规定微震大于某个水平不准放炮，或对微震大的道进行检查、重新埋置。

近年来这方面的工作已取得了不少经验，不少地震队配备了风速计，当风速大于每秒 3～4 m 时不再施工。现在大家已认识到，应该以高频分频档回放记录的好坏来评价记录的好坏，再用分频记录的好坏进一步检验排列上微震水平规定的合理标准。

（四）野外记录上高频微震的产生根源

迄今为止，人们对野外记录上高频微震的产生根源研究得还很不透，不只是我们，国外的勘探地球物理学家也是如此。时下，人们可以不遗余力地去发展“数学高深”的各种新奇方法，却很少有人去深入研究检波器应该怎么埋置。这是一个只重理论、不务实际的偏向。其实，检波器的埋置大有讲究。

一开始我怀疑微震干扰由刮风引起，地表的树皮草根也都起作用，这不错，但还未涉及本质。后来又发现检波器电缆的小辫子抖动也能产生高频干扰，这就牵涉到外壳的设计。再进一步又怀疑检波器存在“寄生振荡”(Spurious Frequency)，有人把它称之为“假频”，是不很确切的。实际上，当地表介质的质点作上下运动时，检波器存在一个水平旋转分量的自振频率。一般出厂时要求寄生振荡频率必须高于 200 Hz 或 10 倍的自振频率，但检波器老化或受损后，这个频率必然会降低。此外，我还怀疑过是检波器的谐波失真造成高频干扰，随后请仪器厂家检查失真度，实测结果却又都是小于 0.2%，没有大问题。

最近才意识到“检波器与地的耦合”是个大问题。若把检波器插在松沙土上，就好比把检波器插在棉花毯上，导致“无风三尺浪”，永远不停地跳动。图 15 就是这种情况：一个插在松沙土上的检波器(第 1 道)会产生比其他埋置较好的检波器强 30～50 倍的高频干扰(频率为 140～160 Hz，引起仪器入口处的电压可高达 120～150 μV)。

后来很多试验告诉我，地表表层的低速带是促使耦合谐振频率降低、振幅增大的主要因素。在松软的低速带中埋检波器，不论埋得如何好，即使做到“平、稳、正、直、紧”，也无济于事。因为我们搞高分辨率正想争取的 80～200 Hz 的频段刚好被微震所占据。

在里坦凹陷的一个试验中，那里潜水面很浅，仅 1 m 左右。当我们把检波器埋深 0.5 m 时，微震干扰的主频就由埋在地表的 120 Hz 升高到 200～250 Hz(图 16)。在滤去 70 Hz 以下的低频后的回放记录上，仪器入口处电压由埋在地表的 10 μV 下降到 5 μV(埋深 lm 时高频微震振幅小 5～10 倍)。这说明检波器深埋对压制高频微震干扰的作用。

但是在徐水地区做试验时，那里的潜水面较深，约 10 m。于是检波器埋深 1～2 m 就不起多大作用，需要埋到 4 m 深才见到微震强度下降 5～10 倍，并且主频向高端移动。这说明微震的强度还与地表潜水面的深度有关。

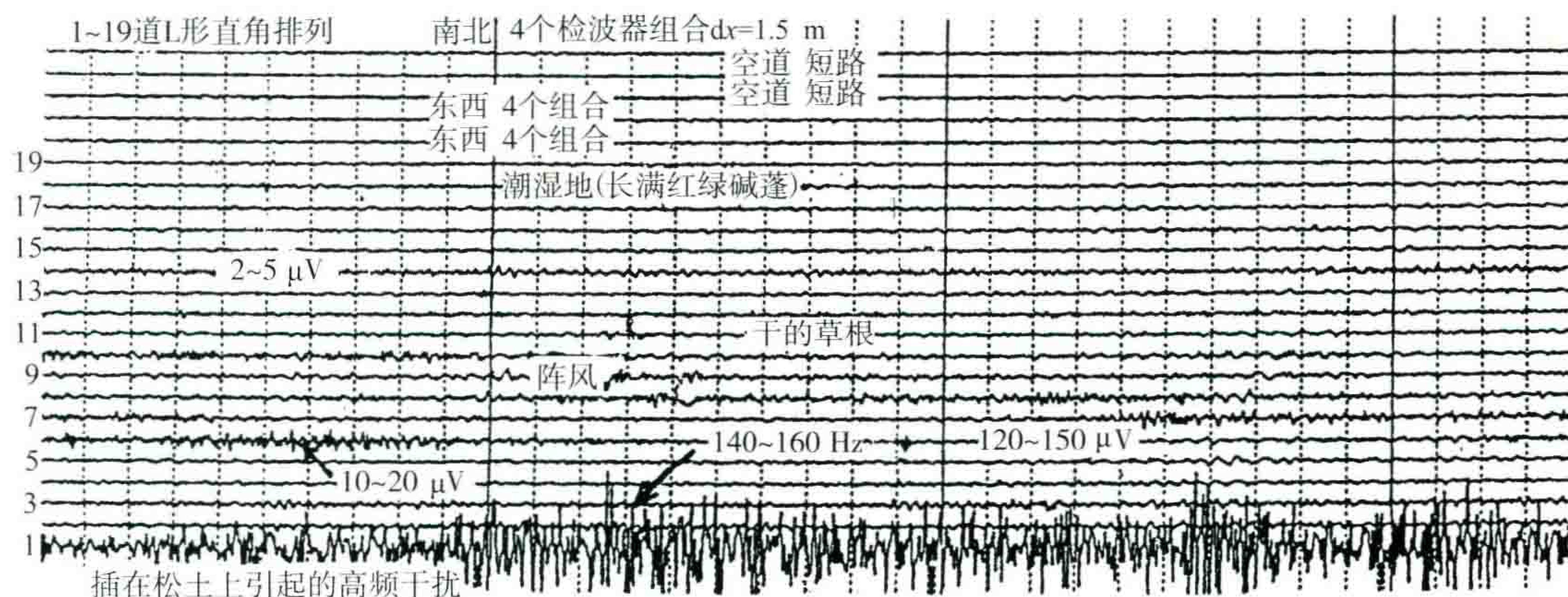


图 15　在里坦凹陷用 L 形直角排列观测微震干扰

（五）检波器与地的耦合响应的测定

1996年3月，我遇到荷兰SENSOR公司的马克斯威尔先生，他给了我一份研究检波器与地耦合的文章，我读后颇有心得。此文是他1994年在EAEG年会上发表的文章。文中说：制造地面仪器的人是工程师，它们只管仪器本身。而地球物理学家只管地下，唯独中间一步，即把检波器插进地里的问题却没有人管，问题也就出在这一步。

1994年，他们解决了与地耦合振荡的测定方法：用一片压电晶体粘在检波器的顶部，然后用等周期的高压方波电压加在晶片上，使其振动。带动检波器在地下跳一下，并在晶片上放电的过程中记录检波器的输出波形。这种波形包括各种环境噪声，不便于分析。于是，采用数百次叠加的方法，便获得比较纯的与大地耦合后的脉冲响应，再对此响应曲线作频谱分析，就可以研究检波器与大地的耦合谐振现象了（实际上此频谱反映了耦合谐振加上检波器自身的频率响应）。

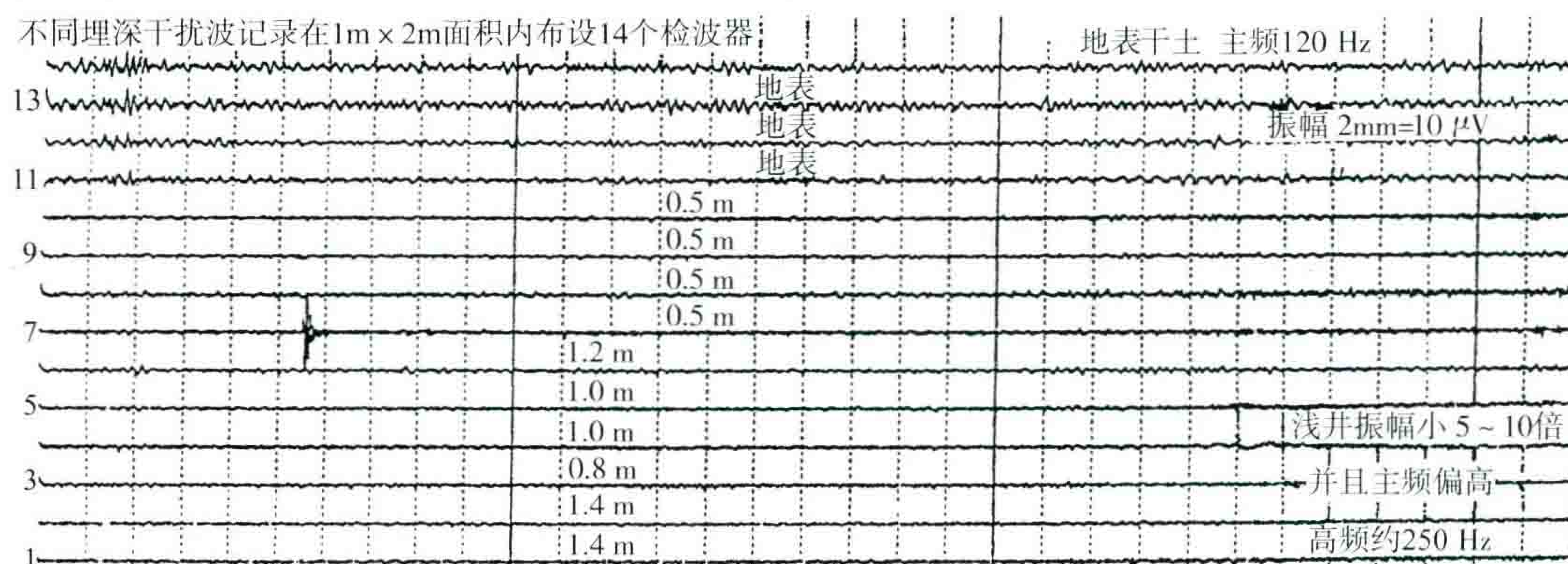


图16 在里坦凹陷同一试验点上不同井深的微震干扰（经高通70 Hz滤波）

过去人们常用一个电脉冲来检查检波器。此法只是线圈动而检波器外壳不动，无法知道与地耦合的情况。用敲击办法检查检波器又避免不了环境噪声的干扰，也无法消除敲击波形本身的影响。可见，SENSOR公司的方法开创了研究检波器与大地的耦合谐振现象的先例。

用了这种方法，首先他们发现如果不注意检波器的埋置情况，耦合谐振的主峰值往往落到80～150 Hz的有用频段中来（图17）。PE-2及PE-3是两种型号的检波器，它们的芯体是一样的，仅仅是外壳设计的不同（图17下方）。当检波器插得浅、插得松时干扰特强，且频率向低端移动。这种谐振还带有很明显的高次谐波性质，其二次谐波的振幅约占主峰值的50%（也就是说波形谐波失真度很大），同时发现，不同地表条件耦合谐振有明显的不同。

他们还作了一个不同地表条件的短剖面，发现埋在软土地上，耦合谐振主峰会低到60 Hz，而结实的土质处为160 Hz（图18），并指出PE-2型检波器外壳底座设计不良，电缆抽头在下，不利于与地的良好耦合。文章中安慰大家说：只要把检波器插紧，耦合谐振在1000 Hz以下就没有明显的峰值。但是由图17可以看出，即使在湿土中把检波器完全插好并埋上土，仍旧有150 Hz的主峰及略小于300 Hz的二次谐波。

所以，我认为这个试验给我们提出一个重要的线索：可能在高分辨率系统工程中，毛病并不出在检波器性能好坏，主要在于检波器的埋置条件。耦合谐振所造成的缺陷，远远大于所有地震仪及检波器的精心改进。

（六）需要什么样的检波器

当前大家在追求失真度（谐波畸变）小于0.1%的所谓“超级检波器”，有的油田不惜重金购买。还有人指望用压制面波的“智能检波器”（Omniphone）来搞高分辨率勘探，也未见到实效。

不少人认为涡流检波器或压电加速度型的检波器好，因为它们有6 dB/oct的高频提升。其实这是很

有限的提升，充其量(从10～160 Hz)4个倍频程也只有24 dB的改善。大地吸收对2.0 s反射的160 Hz的高频信号的衰减量是80～120 dB，上述高频检波器的有限高频提升的作用是微不足道的。现在迫切希望制造一种减少耦合谐振和抗高频微震的检波器。例如，如何降低检波器寄生振荡引起的高频谐振，检波器的外壳如何与地耦合最好，尾锥该多长，磁钢该多长，如何使它不接收横向振动和如何降低谐波畸变等等。

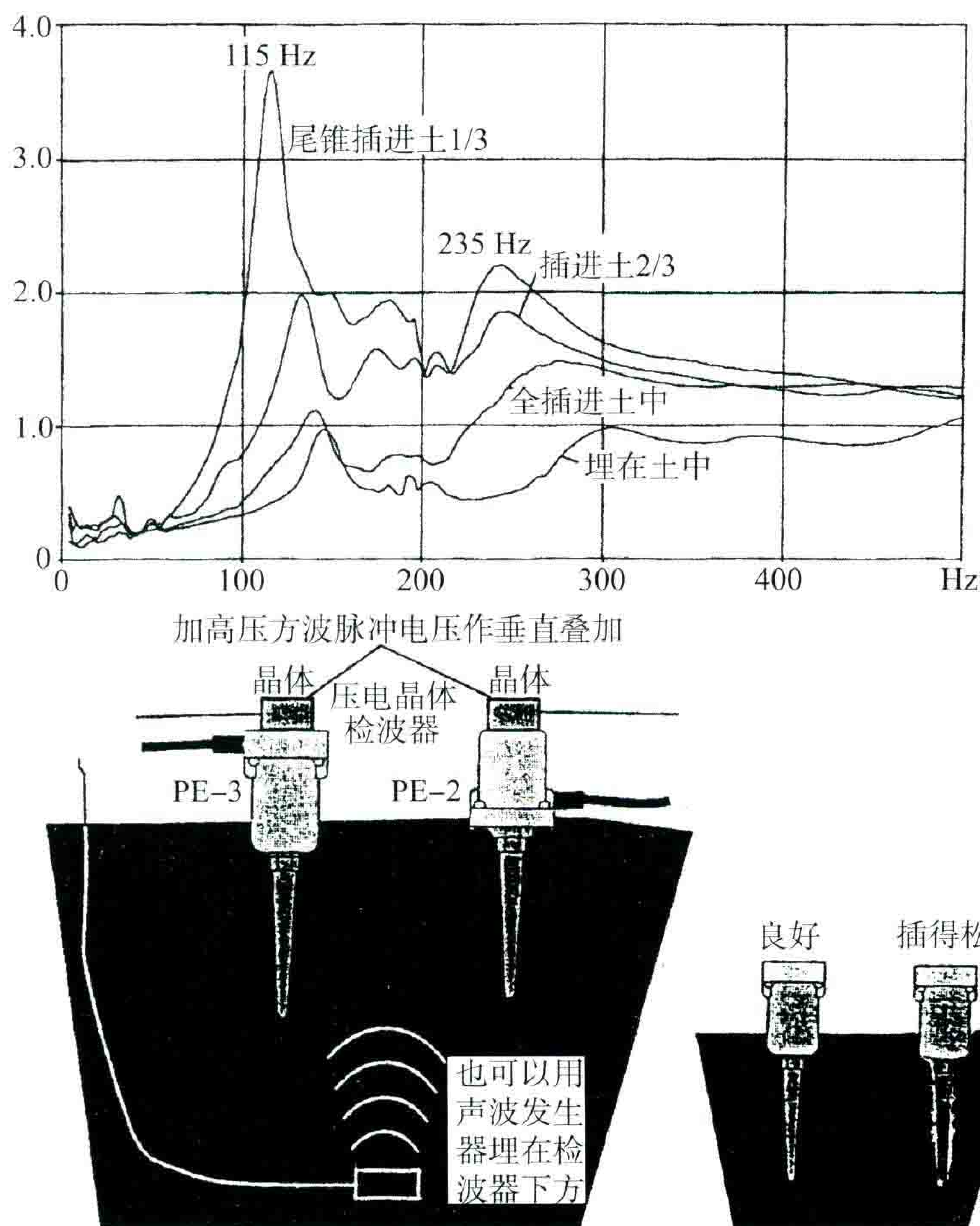


图17 检波器与地耦合谐振的测试(SENSOR公司，EAEG年会报告，1994)

上图为湿土中不同耦合条件下的谱；下图为检验耦合响应的装置

顺便说一下，所有三分量检波器目前的水泡调平结构对高分辨率是十分有害的。我们做了一个试验：如果为了追求把水泡调到中央，则必须轻敲检波器的一个边缘，这样正好导致了尾锥的一边松动，结果产生了严重的耦合谐振。由此我联想到目前野外施工中大多数人是先把检波器往地上一插，然后用皮鞋鞋根踩一脚，就算埋了一个检波器。这最后的一脚如果踩得很正，那就很好；如果这一脚踩弯或踩斜了，就会使尾锥一边紧另一边松，从而产生强烈的耦合谐振。这恐怕是过去人们所没有想到的。

压电检波器依靠压力传递信号，不存在埋置问题，这倒是一个优点。但其灵敏度低，需要多加串联，并且要埋在水中(至少要求5 m的水深)。

各种土壤与检波器组成了一个谐振系统。有人把它简化，比拟为一个重块放在一个弹簧上，于是它必然有一个固有的自振频率。激励它的是风(但风是外因，内因是检波器本身)，风是通过弹簧而起作用的。如果这个系统的自振频率愈低，低到60～250 Hz范围以内，风一吹就谐振起来，就会变成高分辨率勘探的大敌。所以，我们应该深入研究这种谐振理论。

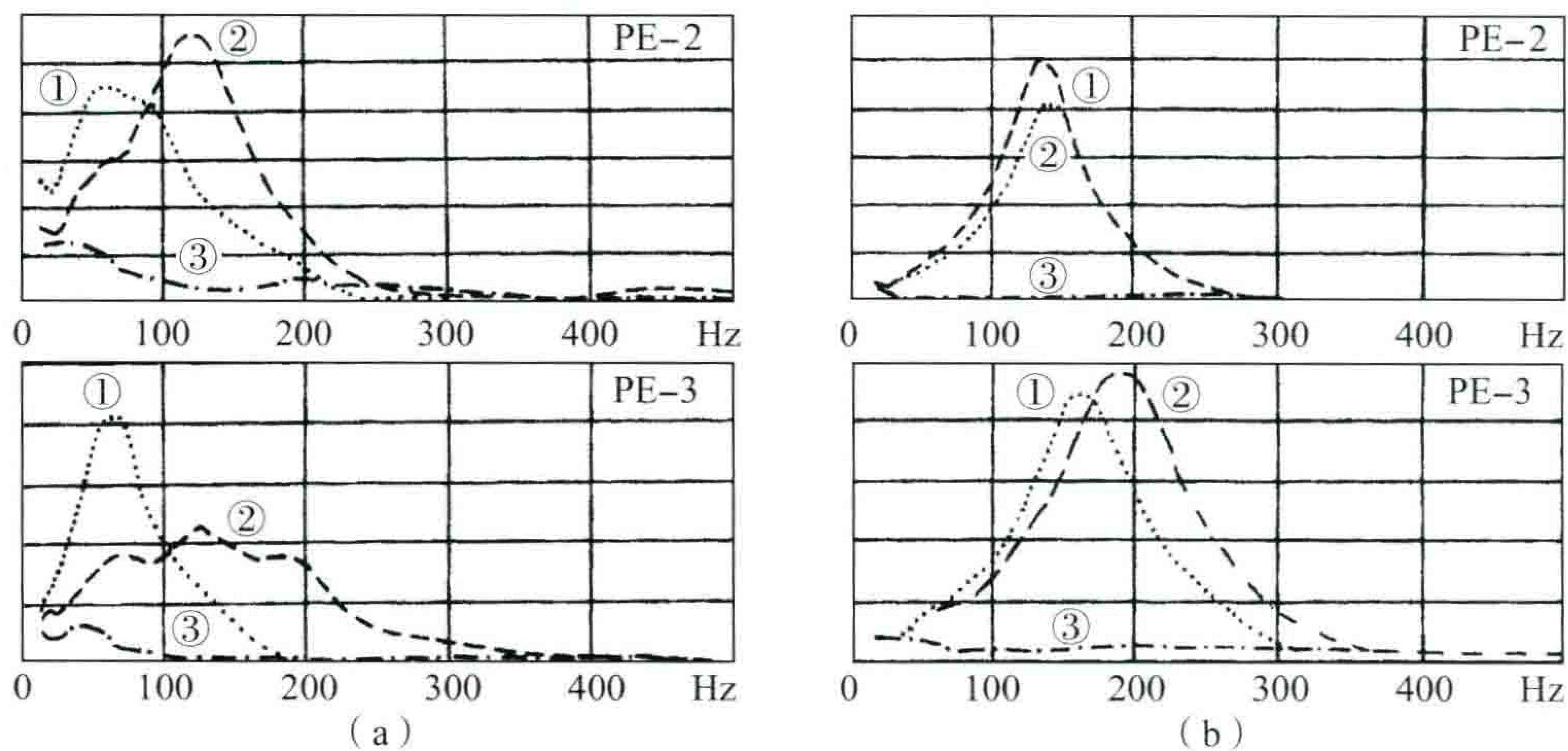


图 18 软土有沟渠(a)和结实土长矮草(b)的接收条件的耦合谐振主峰的对比

① 埋置不好;② 埋置稍好;③ 重新埋好

此外,我认为不只是检波器与地有耦合谐振的问题,地表上各种物体,如堤坝、沟渠、花草树木,甚至低降速带的弹性不均匀性,都各自形成谐振系统,均会产生高频谐振,今后可能还要牵涉到整个低降速带更广泛的研究范围。由炮点激发而引起的"地震次生干扰波"曾经在 20 世纪 70 年代被我们研究过,而由风力激发引起的微震机制却还未见人研究过(最近我发现上述那种地震次生干扰波有着比激发它的一次波更高的频率,不知如何解释,所以高频范围更需注意它)。

微震的传播机制也不太清楚。近年来我作过许多测定,在多数情况下,70～250 Hz 的高频微震的视波长大致为 0.8～3 m,传播速度约 100～200 m/s,衰减规律与频率高低有关,大致是每行走 3～5 m 振幅衰减 5 倍至 10 倍。道间相关半径很小,一般不超过 2～3 m。所以组合内距必须非常小,以 20～50 cm 为好。小面积组合的总跨距一般不应超过 5 m,这样对 250 Hz 的反射有效波是没有损害的。图 19 是伊克昭盟(今鄂尔多斯市)地区利用同一炮激发,在重叠排列上进行检波器组合与不组合的严格对比效果,可以看到小面积组合的明显优势。图 19 上面是 30～60 Hz 频档的对比,下面是 50～100 Hz 的对比。可以看出,组合的好处在高频档上体现得更明显。

然而,最近我发现有些高频干扰(主要是检波器埋置松动所引起的干扰),在道距 20 cm 的小排列上却出现道间波形不相关的现象。这种干扰可能是单个检波器的局部振荡。对付这种干扰当然不需要作组合,只要作统计压噪,或者在分频处理的高频档上作反功率叠加,效果会更好。

为了进一步说明刮风引起微震,再列举伊克昭盟地区刮大风前后所放的两炮记录(图 20)。刮大风时主要是高频干扰,整张记录无同相轴,风停后有效反射的高频成分才得以记录下来。

(七) 放炮激发中的学问

自从人们开始搞高分辨率的工程地震勘探起,就发现小炸药量能够激发出较多的高频能量来,因此大家习惯地认为小炸药量激发效果好。而对石油勘探来说,这恰好是提高高频信号强度的大忌。现在我们已认识到:"高分辨率地震勘探不但不应该用小药量,还应该采用比常规生产更大的药量,因为高频比中低频的能量更弱。"俞寿朋对此也有类似的结论[3]。那么,能不能做到"既增大炸药量而又不至于降低激发主频"的方法呢?这个问题使我联想到 1958—1962 年期间国外关于长条炸药包的试验结果。

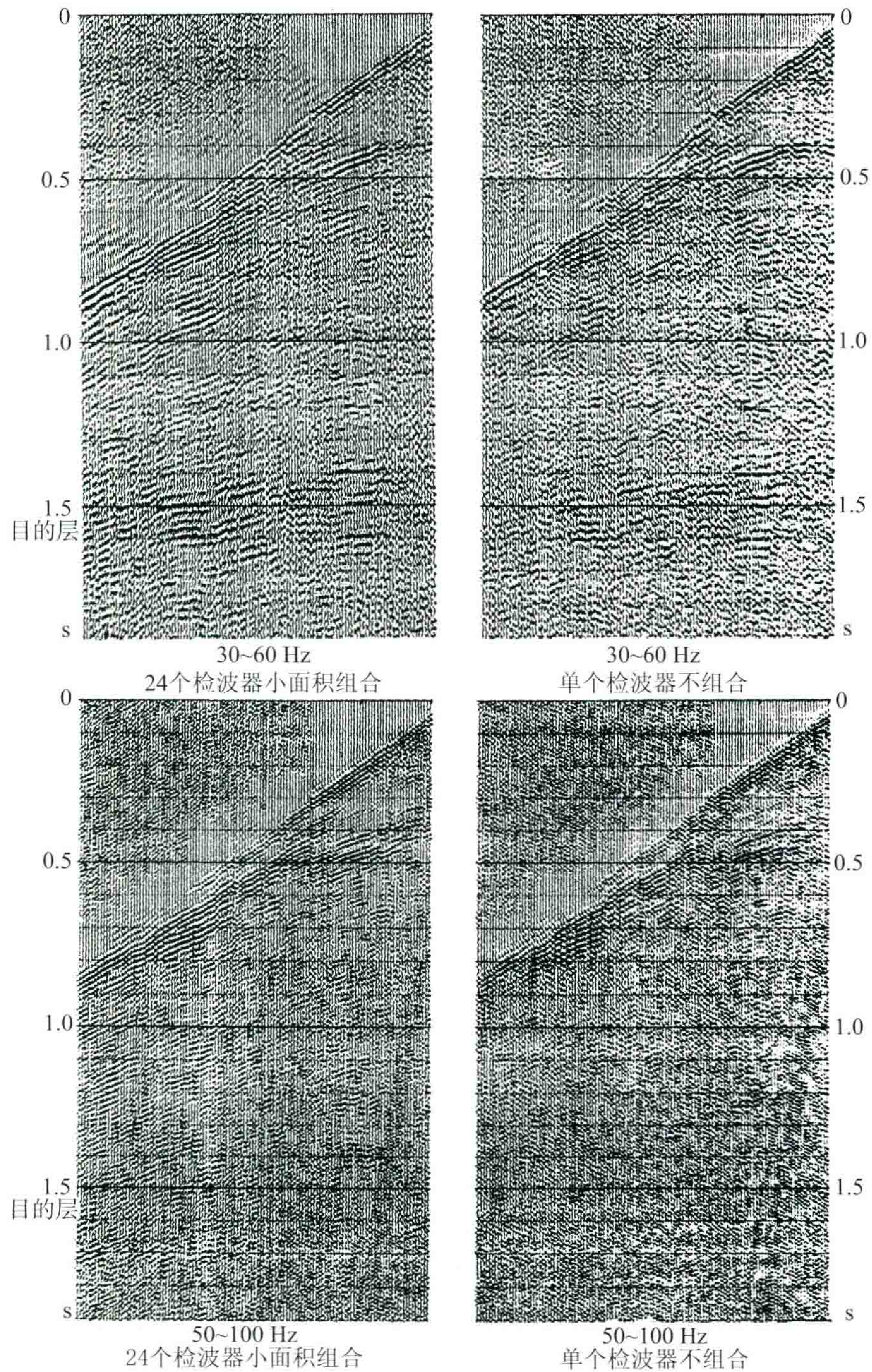


图 19 伊克昭盟地区检波器组合与不组合的效果对比同一炮激发，在重叠排列上接收

1. 关于长药包的试验

S. T. Martner 等人(1962)在美国俄克拉何马州的大套均匀纯泥岩地层中做试验，测定长药包的激发方向特性。他们在爆炸井周围打了几口观测井，在不同深度上放置三分量检波器，并在半径为 125 ft 的不同方位上测定各方向上直达波振幅的强度，得到如图 21 的极坐标图。

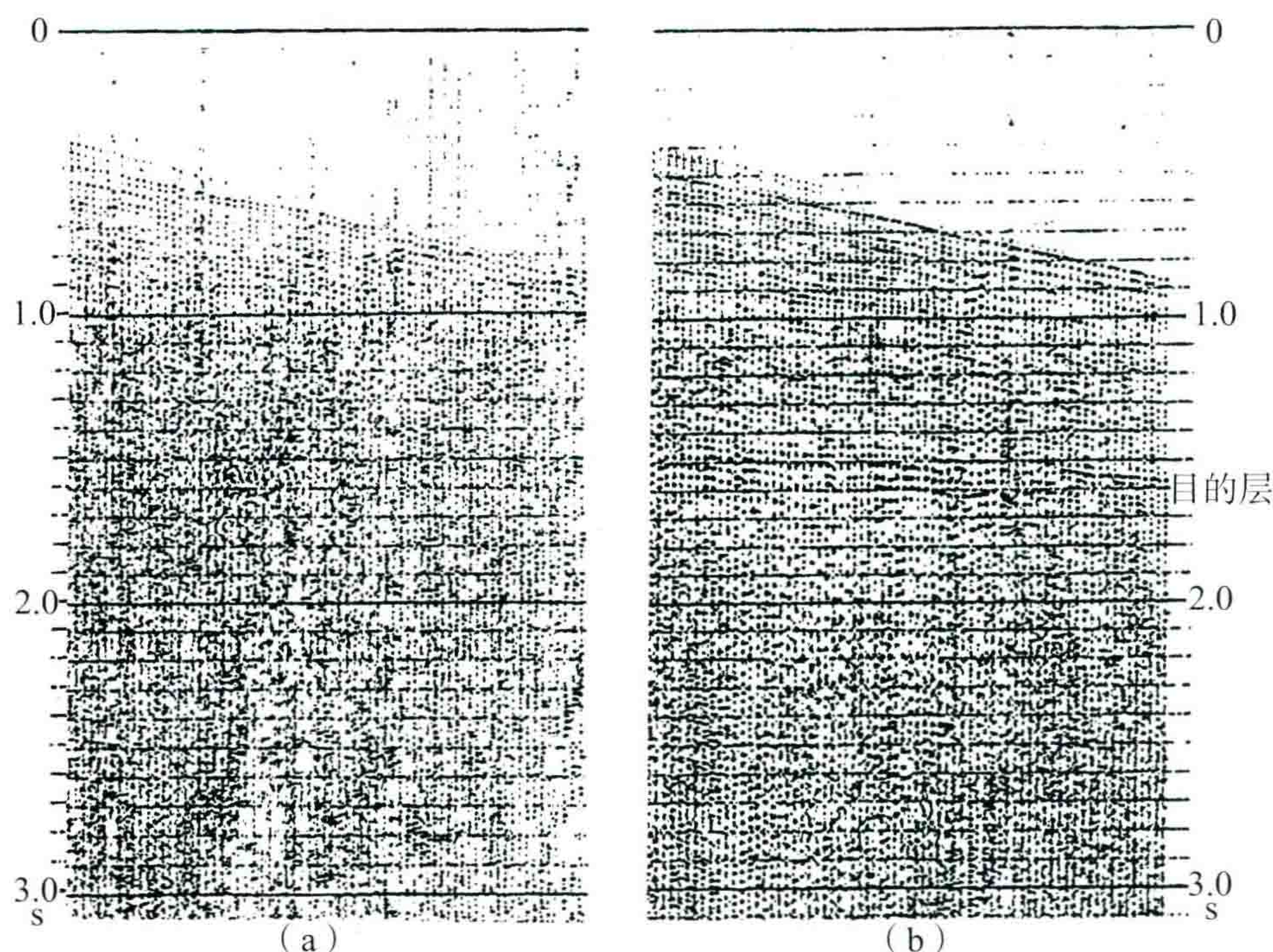


图 20 伊克昭盟地区刮风与不刮风的记录效果对比

(a) 为刮大风时的记录,(b) 是风停以后的记录。

该处泥岩的地层速度为 7 400 ft/s(即 2 360 m/s),他们用集中炸药包(堆成一堆)与长条形炸药包(长 100 ft 约 30 m)作对比。图左边是雷管从顶部激发的,右边是从底部激发的。这两个图用极坐标绘制,很清楚地展示了在 360°各个方向上的振幅分布情况。圆心处为炸药包位置(激发深度为 225 ft)。

先看左图,雷管从上方激发,集中药包基本上是一个点震源,所以各方向上的能量均匀散开,因此其方向特性接近一个圆形,绘在第一个同心圆附近(图中有些扁)。而长条形炸药包却表现明显的方向性,图中绘了两个长的椭圆形,分别代表爆炸速度等于 7400 ft/s 和 6450 ft/s 的两种情况。前者与地层速度相等,方向性最明显,向下的爆力(振幅)比向上的大 20 倍(即能量大 400 倍)。后者是地层速度的 86%,向下的振幅比向上的大 10 倍左右(能量大 100 倍)。右图是雷管在下方激发,此时炸药能量主要是向上的,它会造成很强的虚反射及激发更多的面波及折射波干扰。可惜这次试验的目的主要放在克服虚反射上了,并没有深入分析激发频谱的变化。

2. 延迟爆炸方法

为了激发高频能量,1980 年,M. E. Arnold 等人采用延迟爆炸的方法来获得更高的激发频率。所谓延迟爆炸是用几个分散的小药包,用爆炸速度较慢的导爆索串联起来,再从顶部激发,一个个地连续向下爆炸。由于配好延迟爆炸的导爆索的爆炸速度刚好等于地层速度,此时每个小药包爆炸时,波阵面永远是相切的(图 22)。相切的意思便是振动脉冲是同相叠加的,故能叠加出一个起跳十分尖锐的高频脉冲。同时,由于每一个小药包的药量很小,所以激发的主频就高。因此,这种延迟爆炸方法能够获得高频能量极丰富的振动。图 23 表示了实际使用延迟爆炸与常规爆炸的频谱对比,前者的高频振幅比常规的高出 30 dB(20 倍)左右。

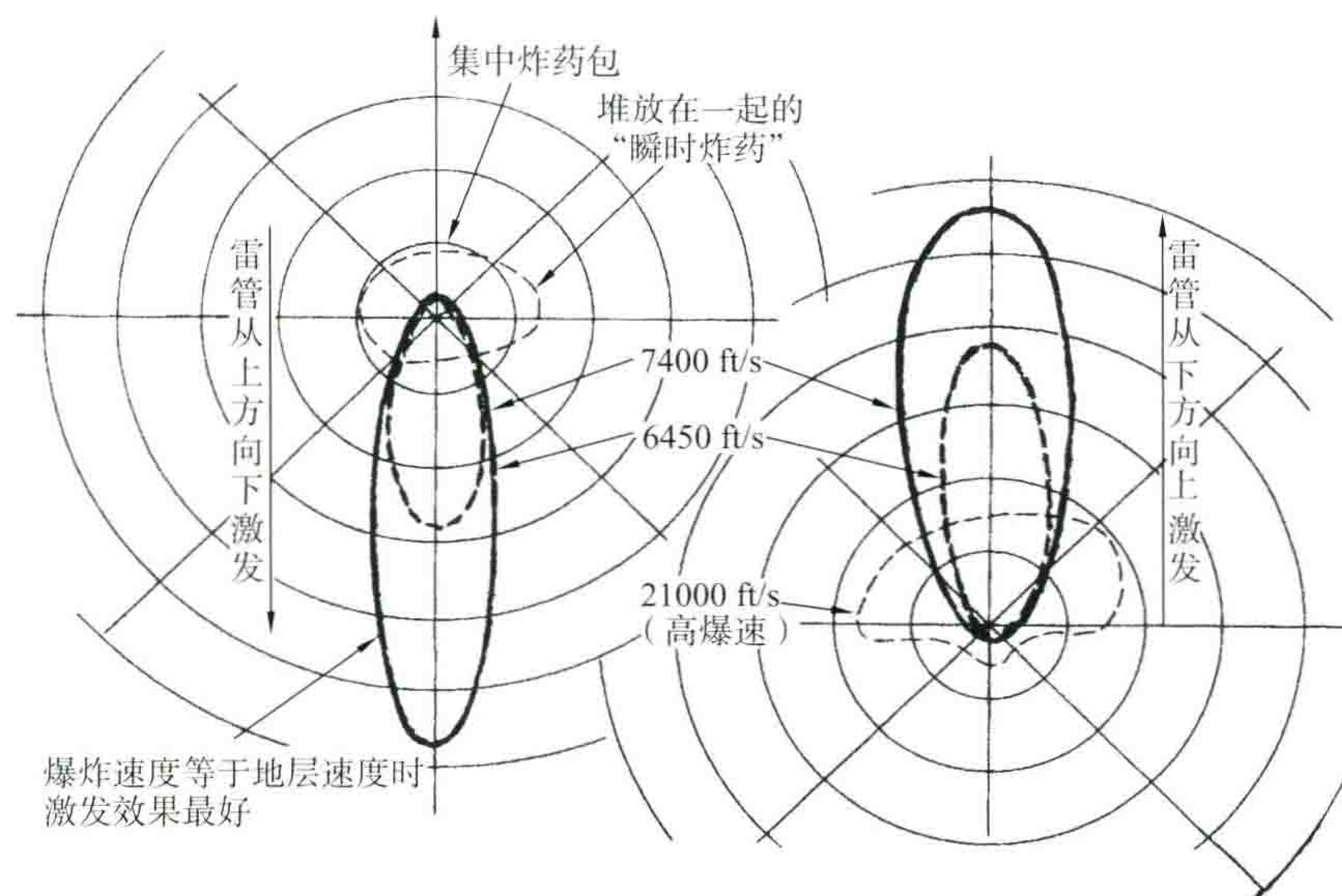


图 21　长条形药包激发能量的极坐标表示图(S. M. Martner 等)

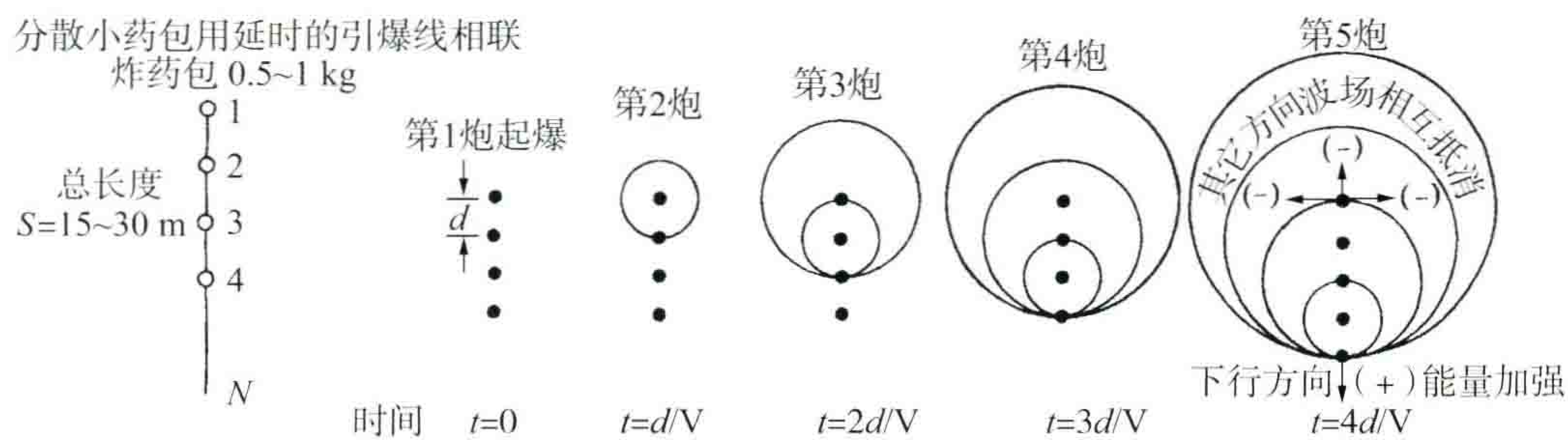


图 22　延迟爆炸原理示意图

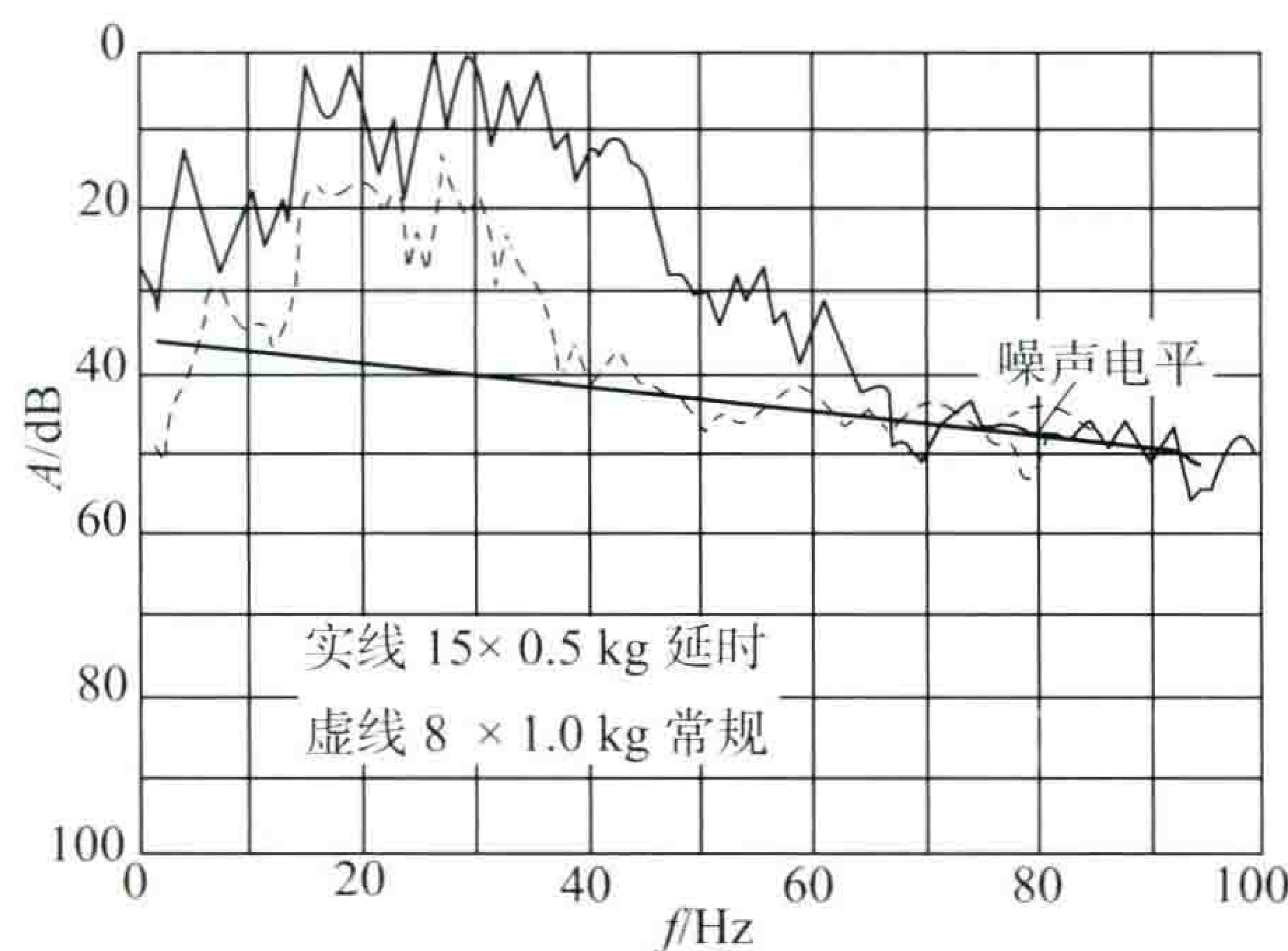


图 23　延迟爆炸与常规爆炸的频谱对比图

1994 年，我们尝试了延迟爆炸方法。采用多根 2 m 长、直径为 9 cm 的木棍，其上刻有 1 cm 深的螺旋形槽，螺距为 9 cm，并用导爆索(爆速 6500 m/s)绕在螺纹中。然后在螺纹木棍两头放置集中小药包，雷管仍然放在上方小药包内，使螺旋形点火造成 3 倍的延迟时。这样形成的爆速即可等效于地层的速度 2000 m/s，达到延迟爆炸的目的。这种方法曾在内蒙古赛汗塔拉的试验中效果不错。但是螺纹加工费很贵，导爆索价格也较高，野外绕制又困难，所以至今没有用于生产。

国外在 20 世纪 80 年代也曾经出现过多种螺旋形导爆索点火的专用爆炸柱，后来多因为加工成本过高而无人使用。

3. 低爆速细长药包

1994年，我们想到一种"低爆速、细长药包"的办法。其实，细长药包相当于无数多个小药包的串联。此法有四个优点：第一，细药包药量小、激发主频高；第二，具有长药包的方向特性；第三，解决了小药量药包能量不够的问题；第四，利用低爆速的性能产生延迟爆炸的效果。

当时，我们采用爆速为3000 m/s的粉末炸药(我国目前炸药厂最低爆速可以做到2300～2700 m/s)，用直径32 mm的农用塑料水管灌装起来，做成6 m的细长药包，可以获得激发频率偏高并且反射能量较强的效果。

当爆炸速度等于炮井中炸药柱附近的地层速度时，药包的长度愈长就愈好。当爆炸速度不等于井下地层速度时，长药包就相当于一个垂向的组合爆炸，它具有低通、高截作用。组合爆炸的高截作用取决于起爆时间差。从顶到底的爆炸时间差公式为

$$\text{爆炸总时差 } \Delta t = \text{药柱长度 } L \times [(1/\text{地层速度}) - (1/\text{爆炸速度})]$$

式中，方括号里就是药包每一米长度间隔中的爆速与地层速度差所造成的时间差。

我对一个爆炸总时差为Δt的组合爆炸的频率响应作了理论计算，其结果如图24所示。

当总时差$\Delta t=10$ ms时，高频将全部牺牲掉；$\Delta t=6$ ms时，高频大致可保留到100 Hz(−6 dB)；$\Delta t=3$ ms时，则200 Hz的高频可以被保留到−6 dB；$\Delta t=1.5$ ms时，则高频可保留到400 Hz。

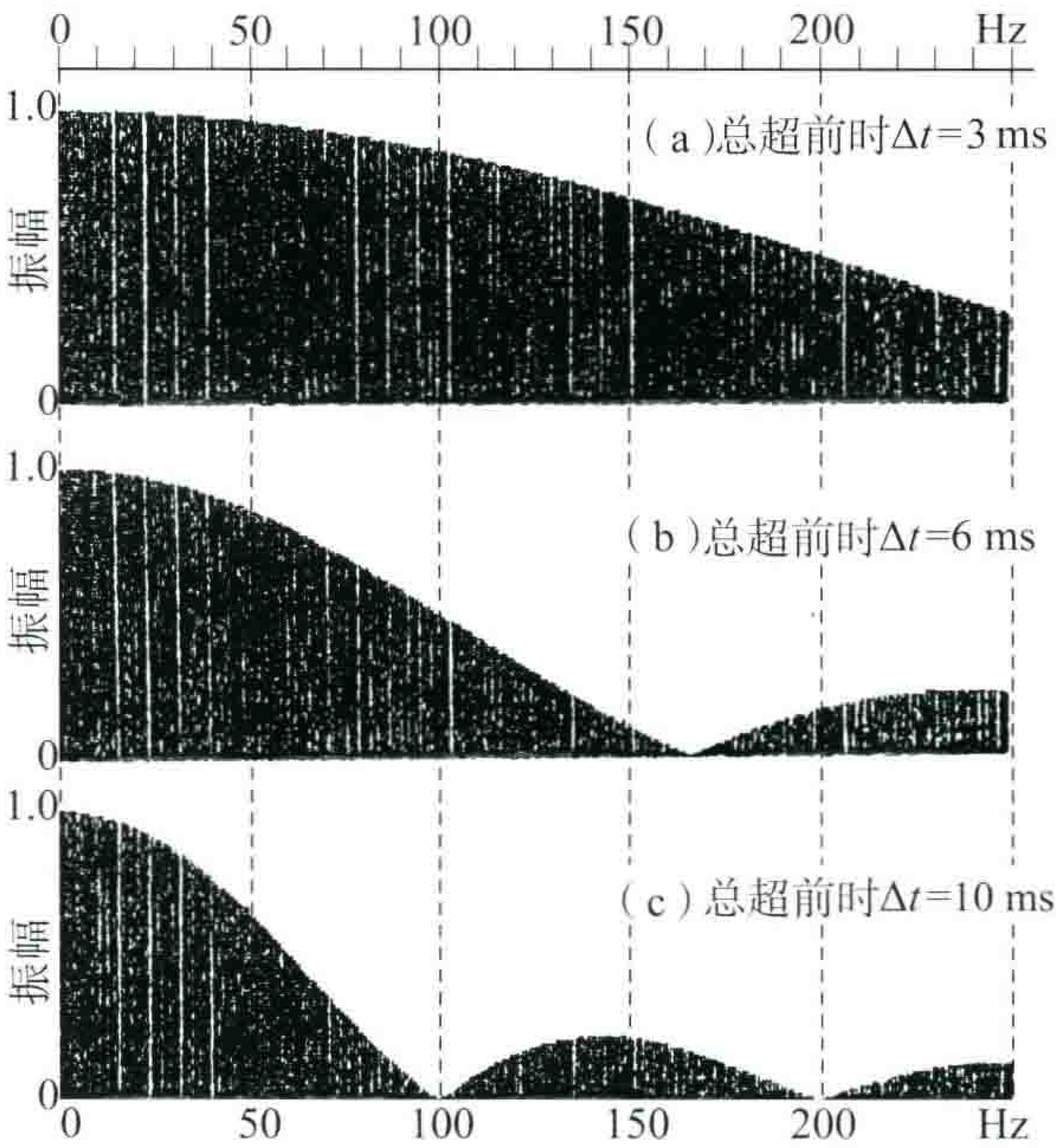


图24　不同的爆炸超前时引起的高频衰减

以下举例说明。

例1　在内蒙古二连盆地，爆炸的地层速度为2500 m/s时，如爆炸速度为2800 m/s，则有表2数据。由表2可见，当药包长度加长到30 m时，尚可以保证500 Hz高频的激发能量。

表2　爆炸总时差与药柱长度的关系

药柱长度 L/m	10	20	30	60
爆炸总时差 Δt/ms	0.43	0.86	1.29	1.58

例2　在我国东部第四系潜水面下爆炸的地层速度为1800 m/s时，若低爆速炸药的爆速为2800 m/s，则有表3数据。由表3可见，若在第四系潜水面下爆炸，只要爆速接近2800 m/s，则细长药包的长度大致可以加大到15 m，Δt不超过3 ms，不至于影响200 Hz高频的激发能量。如能使用2300 m/s爆速的炸药，则

效果会更好。

我认为这是我国东部地区可以采纳的方案，它将是“增加药量的同时保持激发高频能量”的有效措施，也是今后高分辨率地震勘探的一个重要技术措施。

表3 潜水面下的爆炸总时差与药柱长度的关系

药柱长度 L/m	1	5	10	15	20
爆炸总时差 Δt/ms	0.198	0.99	1.98	2.97	3.96

其实即使不搞高分辨率勘探，也应该在常规地震队中推广使用低爆速长条形炸药包，以提高爆炸的实效。因为常规炸药包的爆炸能量只有很少的一部分向下传播，其他大部分能量都浪费了，甚至去加强面波、折射波及多次波。在使用细长药包后，炮井井深大约要增加10～15 m，固然会增加钻井工作量，但我们可以相应减小炮井钻头直径，提高钻井工效。我国海南福山凹陷及河北老爷庙地区存在严重的层间多次反射，如果使用细长药包，将会有助于抑制多次波。

细长药包的直径以30～35 mm为好，并要密封防水，保证在3 atm下不进水，24 h后能放响炮，并保证一爆到底。至于药包长度是相对地震波波长而言的，所以我认为药包长度只有大于10 m才能称为长药包。在使用长药包后，井口垂直时(τ)的校正量将从井底算起，即普通τ值加上药柱的总时差Δt。

雷管质量差，可引起±2 ms的起爆时间误差，雷管与炸药的连接方式也有待改进。目前，经常发生雷管不响，或者雷管响了炸药不炸的现象。有时还出现炸药柱上面的一包响了，下面一包不炸，从而造成野外记录上相邻炮的能量不一致，波形也不一样。这类严重情况，会导致资料处理的子波不统一，动静校正作不好，最终损害高分辨率。

这里需提一下，有些油田尝试了用聚能弹作为控制爆力方向的措施，我认为这需要慎重加以考虑。因为作为兵器的聚能弹主要是为穿甲及爆破而用的，它转换成弹性波的成分较少。其次，更关键的是它的尺寸与地震波长之比太小。从微观地看，它虽然具有方向性，但传播到100 m以外，再宏观地看，实际上还是一个点震源作球面扩散，并无明显的方向性。所以不要光看其药量小，激发主频偏高，就以为它的效果不错。而应该在100 m以外，进一步测定它的实际方向特性，才能对它作出准确的结论。

现在再重新考察一下图21及图22的爆炸方式之所以有方向性，并不是因为炸药本身具有方向性。而是它们依靠地层中传播的波阵面在不同方向上的叠加作用，实现了远处能量分配的方向性。只有垂直向下的方向上波阵面是相切的，才能叠加出一个尖锐的高频强脉冲。其他方向上波阵面不同时到达，干涉能量互相抵消，因此能量很弱。

（八）可控震源与压电水听器的优点

高分辨率勘探中的另一种可以考虑的震源是可控震源。它的优越性在于扫描时间的加长可以有效地在相关中压制高频随机干扰，并可实时地进行多次垂直叠加，直到高频端达到足够的信噪比；还可以根据具体情况利用“非线性扫描”及“分频段变频扫描叠加”灵活地改变施工因素。这些都是可控震源的独特优点。它的缺点是其高频振动特性不够好，容易发生与地脱耦现象，而且一般说来可控震源所激发的能量总显得不如炸药震源。此外，由于可控震源在地面振动，它多了一个低降速带双程的吸收量，也是其不利的一面。

1966年，法国地球物理总公司的AMG公司已推出大吨位的震源车，其出力为5×10^4～6×10^4 lb(相当于222～267 kN)，扫描工作频率为6～250 Hz。我想，这种震源车可能适合于高分辨率勘探。

水听器在井中只要有5 m以上的水柱压力就能较好地工作，不存在什么与地耦合的谐振问题。今后如果采用15 m细长药柱，其顶部是潜水面，那么在炮井井底埋水听器便是较好的方案。水压肯定是够了，只要防止它漂浮上升，并且采用多个串联以补救它灵敏度之不足，就可以有效地压制高频噪声。但是从井下20 m深度将它回收上来，这不是件很容易的事。过去国外采用一次性的压电晶体，不再回收。然而，我们多加串联后，不回收成本就高了些(每片压电晶体价格约40元)，不过，这也不失为降低高频噪声水平的

一种方案。当然，这个方案不能再用组合检波，然而在串联的过程中，是否可以考虑不捆在一堆，而把多个压电晶体上下拉开成 2～3 m 总跨距(像糖葫芦)，使其起到垂向组合的作用，也能压制高频噪声。

五、江汉油田的一条高分辨率地震剖面

最近江汉油田在蚌湖地区完成了一条高分辨率地震剖面，如图 25 所示。这条剖面上 0.5 s 的主频达到 130 Hz，1 s 时为 110 Hz，2 s 时为 80 Hz，而且剖面上地震波形大多数已经缩到一个相位。这是近年来我所见到的陆上资料中分辨率最高的剖面。可惜他们没有把它作成波阻抗剖面，地质效果没有充分显示出来。这条剖面的野外采集主要因素如下。

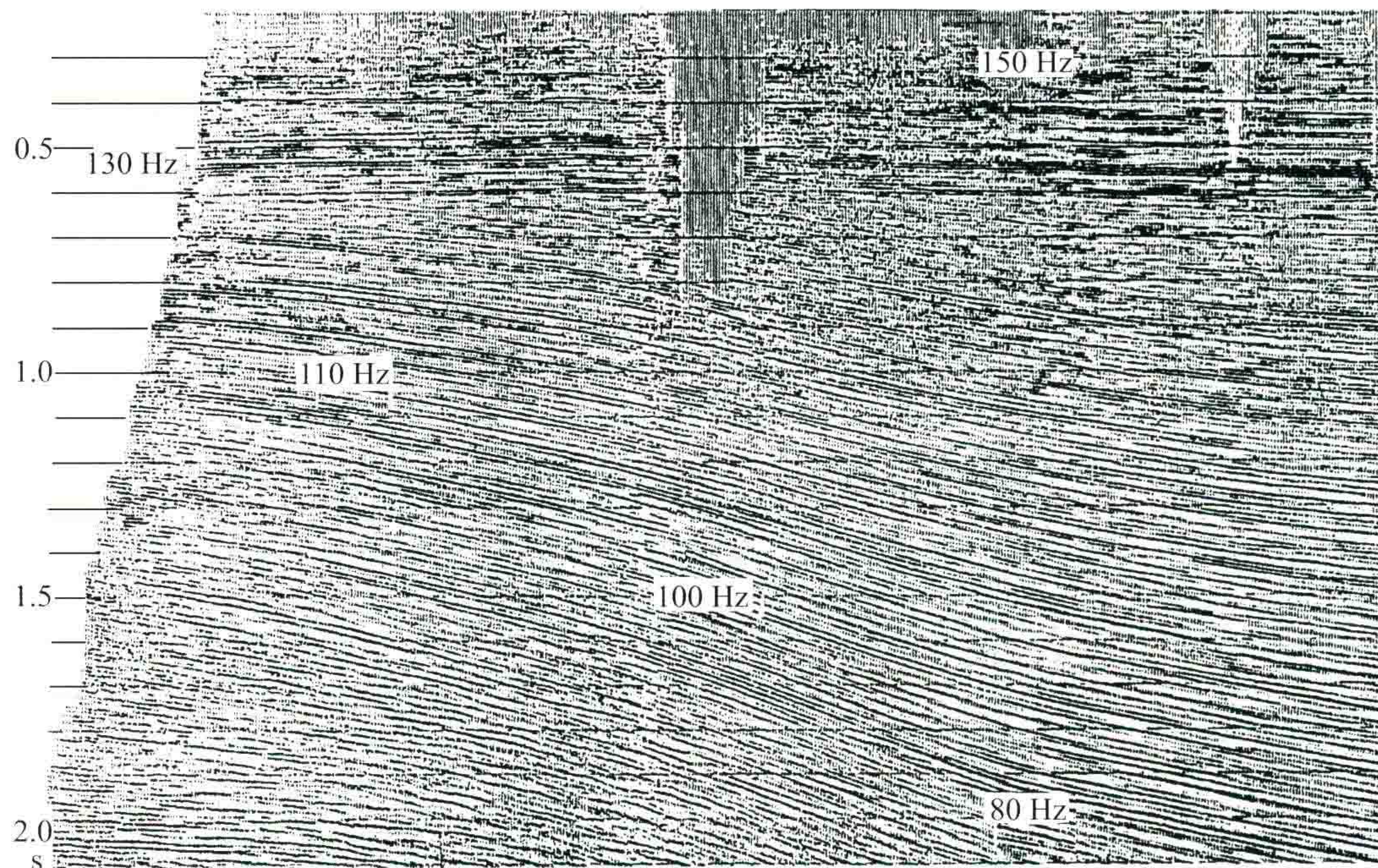


图 25　江汉油田蚌湖地区的高分辨率剖面

(1) 炸药量增大到 12 kg(两口井，每井 6 kg)，这是突破了小药量的老框框了，若能采用细长药柱，其效果定会更好。

(2) 检波器采用常规 10 Hz 的国产检波器，5 串 2 并，10 个合起来封装在一个长铁筒之中，有长尾锥，总长约 40 cm，埋置于 60 cm 的坑中。每道只用一个封装检波器，无组合，这是他们为了适合江汉水网区的特点而制作的。我估计这种检波器与地耦合较好，并且不漏水，不漏电。当然，关于不组合的问题，我在前面已经讲过了，除非野外条件不允许，或者耦合谐振频率已经高过 250 Hz，否则还是组合好。

(3) 仪器采用了国产 YKZ-480 地震仪，14 位 IFP 的 A/D。它的前放增益采用了 F_1 为 124 Hz，陡度为 18 dB/oct，F_2 为 350 Hz，这是符合“把截频当成通频用”的原则的。曾经有人担心这样做可能把低频压掉，其实不然。这条高分辨率剖面资料后来采用低频处理，其低频成分并没有丢失。

图 26 是图 25 的野外单炮原始记录。图 26(b)和 26(c)分别是 80～160 Hz 及 100～200 Hz 高频档频扫记录。图中分别标出了它们在 0.5 s 及 1.8 s 处的实际视频率，在 100～200 Hz 频档上 1.8 s 处有很不错的反射同相轴，视频率达 110 Hz，可见不是频域泄漏。

总之，这是一条很好的剖面。它使我们建立起信心：在我国东部陆上和南方的第三系盆地中，把高分辨率地震勘探搞上去是完全可能的。我认为，只要是潜水面较浅的地区(如渤海湾沿海地区及水网地区、塔里木河畔)，都可能达到这个效果。关键是要走出误区，提高认识，采取针对性的措施，必然会有效果。

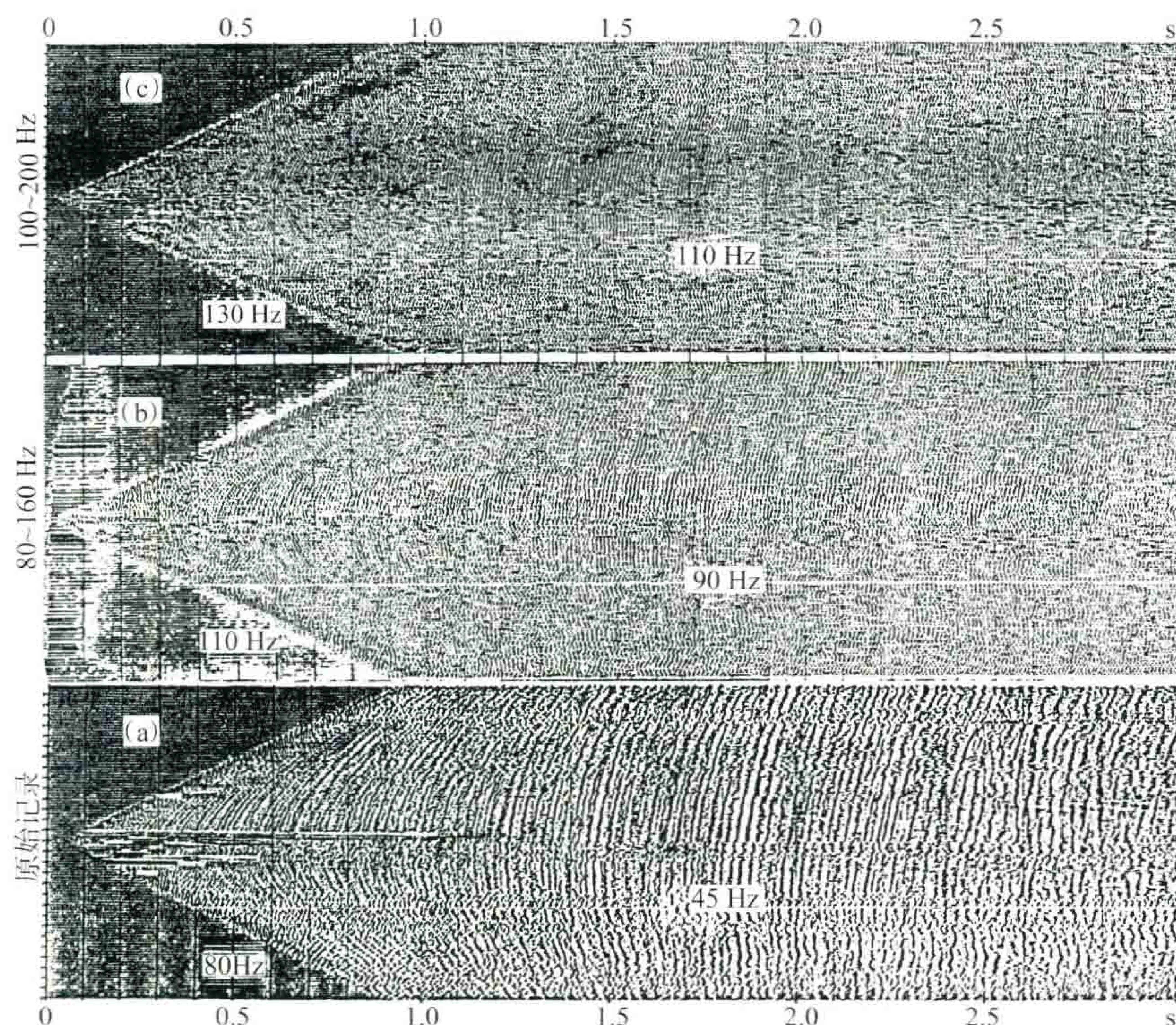


图 26 江汉油田蚌湖地区 96-LJ-3 测线的单炮分频扫描记录

(a) 为原始单炮记录;(b) 为 80～160 Hz 的频扫记录;(c) 为 100～200 Hz 的频扫记录

六、对提高分辨率能力的估计

有人认为提高分辨率是今后长期的任务,没完没了。我认为提高分辨率不是无限制的,就采集和处理方面的潜力大致可作如下估计。

(1) 降低高频环境噪声,这方面的改进大致可以提高高频的信噪比达 10 倍(20 dB)。

(2) 改进激发条件,在不降低主频的条件下加大药量,提高高频反射能量,估计可将高频信噪比提高 10 倍左右。

(3) 在处理中继续改进高频的信噪比至少可达 10 倍。

以上三项估计可提高信噪比 1000 倍,即 60 dB,这已经是一个比较乐观地估计了。

表 4 是笔者根据陆上平原区资料的地层吸收特点[2]计算信噪比每提高 10 倍(20 dB)能够扩展多少高频成分的数据。表中:G 为吸收量;救活频率数等于 20 dB/G。

表 4 信噪比改善 10 倍(20 dB)时挽救高频的效果表

双程反射时间 T_0/s		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
吸收量 G/(dB/Hz)	新生界	−0.37	−0.54	−0.67	−0.76	−0.84	−0.91
	中生界	−0.25	−0.36	−0.44	−0.51	−0.56	−0.60
没有提升高频时原始的死亡线频率/Hz(−60 dB)	新生界	160	110	90	78	71	66
	中生界	240 *	167	135	118	107	100
信噪比改善 10 倍能救活的高频数/Hz	新生界	54	37	30	26	24	22
	中生界	80	56	45	39	36	33

注:① 浅层 0.5 s 数据尚要求改进采样率、减小组合基距等措施;② 此外注意最高频率不等于主频,最高频率约等于主频的 1.6～2.0 倍;③ 此表高频死亡线频率仅仅从瞬时动态范围的角度出发的,未考虑信噪比的情况。

表5是海上资料的信噪比改善10倍(20 dB)时挽救高频的效果表，注意，海上资料不存在地表15 m左右的额外吸收量(约0.1～0.15 dB/Hz)。

表5　信噪比改善10倍(20 dB)时挽救高频的效果表

双程反射时间 T_0/s		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
吸收量 G/(dB/Hz)	新生界	−0.22	−0.39	−0.52	−0.61	−0.69	−0.76
	中生界	−0.15	−0.26	−0.34	−0.41	−0.46	−0.50
信噪比改善10倍能救活的高频数/Hz	新生界	91	51	38	33	29	26
	中生界	133	77	59	49	43	40

由表4可知，对陆上第三系地层来说，在2 s的深度上，信噪比每提高10倍可扩展高频约26 Hz。于是在改进信噪比1000倍(60 dB)的条件下，高频端只能提高频率26×3=78 Hz。这大概就是第三系盆地的潜力的极限。注意，这是对最高频率的讨论，主频的提高还不够这个数字，大致还要除以2左右，即2 s的主频大致可以提高39 Hz。再要提高当然不是不可能，只是代价太高而失去经济价值了。由表5可知，海上资料的潜力就比较大了。

以上是关于提高高分辨率潜力的估计，显然这只是一个粗略的表达。对不同的地区，难度不一样，还会相差很大。但我想指出，这个潜力并不是主观上想多大就有多大，而且是愈到后来，每提高10 Hz所花的代价就愈高，这是人们应当认识到的。不过就目前来说，我们从采集到处理的过程中，大而化之扔掉的分辨率还很多。所以，我认为目前的潜力还很大，需要人们认真地把应有的分辨率找回来。

七、结论和建议

(一) 结论

(1) 高分辨率地震勘探目前仍处于摸索阶段，对以往的经验不注意认真分析往往会成为前进道路上的障碍，形成认识上的误区。如果再不提高认识，就会变成盲目的实践。殊不知有些老框框和习惯势力还是很难突破的。

(2) 唯武器论是当前比较普遍的倾向。对于目的层在2 s以下的石油勘探来说，现有的国产地震仪器和国产检波器是完全可用的，关键在于严格的野外施工。

(3) 高频微震的外因是风，而内因是检波器与地的耦合谐振及地表低速带的谐振特性，这方面还应加强研究。

(4) 炸药的爆炸方式亟须改进。低爆速细长药包是今后的发展方向。

(5) 渤海湾沿海潜水面浅的地区及水网地区，采用密封良好的长尾锥沼泽检波器，埋深0.5 m(取出浮土，埋实)，并争取用小面积组合。使用低爆速细长药包，长度10～15 m，炮井深约18～25 m(药包顶部在潜水面以下1 m)，药量12～15 kg，在小风或无风时施工，可以取得很好的效果。

(6) 潜水面较深的地区，可以采取埋深30 cm，加小面积组合，或者把检波器或水听器埋在炮井里，再用低爆速细长药包的方法，也可得到好的效果。

(7) 海上提高分辨率的潜力还很大，需要改进组合气枪阵，使其实现垂直延迟爆炸。接收电缆中要加密检波器内距，增加其组合效应。

(8) 地震剖面上主频达到100 Hz时，再把它转换成波阻抗剖面，就可查清5～6 m的砂层，甚至厚度2～3 m的薄储集层也有反映。此时才能进行储层研究，开发地震的新局面才会出现。

(二) 建议

(1) 由于地震勘探提高分辨率的难易与如下几个因素有关：海上容易陆上难；浅层容易中、深层难；老

地层容易新地层难；潜水面深的比浅的难；平原容易丘陵地难。这5个“难”字的难度差别是以几倍、几十倍、几百倍计算的。所以不能“一刀切”，即不能不分地区、不分深浅提出要查明多少米厚的储层的不合理指标。也不应该在难度很大的西部沙漠地区，或者目的层很深的地方去部署野外高分辨率攻关，非要求分辨率达到多少多少。有些地区信噪比很差，目前还没有取得起码的反射资料，更不应把重点放在提高分辨率上。

高分辨率勘探的攻关应主要在我国东部水网地区及潜水面浅的地方开展，那里有突破的条件。而且一旦成功，开发地震就能发挥效益。但切忌一哄而上，大家做低水平的重复试验。

（2）对面上的资料来说，不一定需要重新去作野外高分辨率施工攻关。不少五六年前的老资料，通过重作高分辨率处理，便能不同程度地取得好的效果。因为最近几年，在资料处理中出现了不少的有效新模块，可以改善分辨率（但是应该注意不要搞出假分辨率来）。

（3）高分辨率勘探的攻关，应该提倡大家对地震信号及高频噪声作大量的“理论联系实际”的深入“调查研究”。不实地调查研究，光指望搬用什么高深的、新奇的数学理论是不行的。野外采集方面要有定量、半定量的统计调查，室内处理方面要有数据模型及模块功能测试和理论指导。需注意，不要受以往常规的处理经验和老框框的束缚。

（4）本文主要分析了仪器及采集方面的误区及出路，有关处理及解释方面也有很多误区，有待今后继续加以讨论。

参考文献

[1] 李庆忠. 对地震勘探的分辨率、信噪比与保真度的再认识[N]. 石油物探信息，1994-06-01.

[2] 李庆忠. 走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析[M]. 2版. 北京：石油工业出版社，1995.

[3] 俞寿朋. 高分辨率地震勘探[M]. 北京：石油工业出版社，1994.

[4] 云龙. 不同遥测数字地震仪的野外效果对比[R]. 天津：石油地球物理勘探局第一地质调查处，1993.

[5] MARTNER S T, SILVER D. Broomstick distributed charge[J]. Geophysics，1962，27(6)：1007-1015.

[6] ARNOLD M E, HAYLETT J W. A new distributed charge[J]. Geophysics，1980，46(9)：1216-1226.

长条形炸药包的方向特性

——对《地震高分辨率勘探中的误区与对策》一文的补充



这是对《高分辨率勘探中的误区与对策》一文的补充。重点进一步讨论了长条形炸药包的方向特性，纠正了原文中对长条形炸药包的过高评价。

2013 年，我通过自编的程序，从理论上计算了长条形炸药包的方向特性。发现只要爆炸速度等于地层速度，高频 100～200 Hz 的方向特性就集中向下。但是低频 50 Hz 分量，就欠缺方向性。所以长条形炸药包适合于工程地震，而对石油勘探所起作用不明显。

但是长条形炸药包可以在地表浅层有火成岩屏蔽的地区发挥其功效，使炸药能量集中向下，去激发有效反射波。

一、炸药激发的理论

我们搞了几十年的地震勘探，可是关于放炮的理论所知还是很少。制造炸药的人主要考虑如何使炸药发挥爆破的功能，主要想炸开矿山，或穿透敌人的坦克铁甲……他们不关心如何使炸药产生地震弹性波。直到 2005 年，我们物探局组织了一个学习班，讲炸药激发的教材还问题不少，请看图 1。

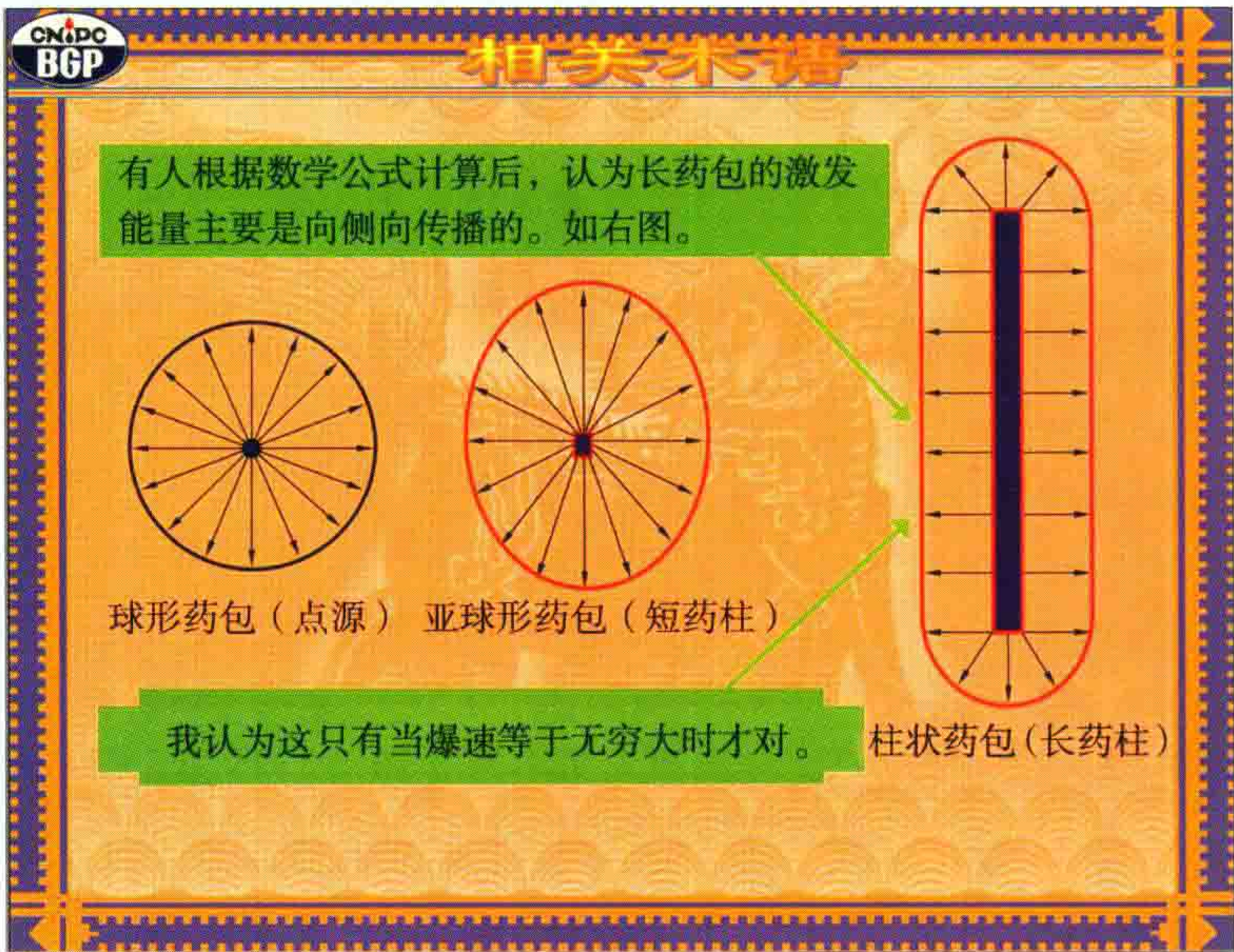


图 1　不同形状药包爆炸气体的做功形式示意图

他们认为长条形炸药产生的地震波能量主要是向侧面轰击的。

我认为这只有当爆速等于无穷大时才对。

（一）关于长药包的试验

早在1962年，美国已经有人做过长条形炸药包的方向特性的试验，结论是它有垂直方向的集中力。

S. T. Martner等人(1962)在美国俄克拉何马州的大套均匀纯泥岩地层中做试验，测定长药包的激发方向特性。他们在爆炸井周围打了几口观测井，在不同深度上放置三分量检波器，并在半径为125 ft的不同方位上测定各方向上直达波振幅的强度，得到图2的极坐标图。

该处泥岩的地层速度为7400 ft/s(即2260 m/s)，他们用集中炸药包(堆成一堆)与长条形炸药包(长100 ft约30 m)作对比。图左边是雷管从顶部激发的，右边是从底部激发的。这两个图用极坐标绘制，很清楚地展示了在360°各个方向上的振幅分布情况。圆心处为炸药包位置(激发深度为225 ft)。

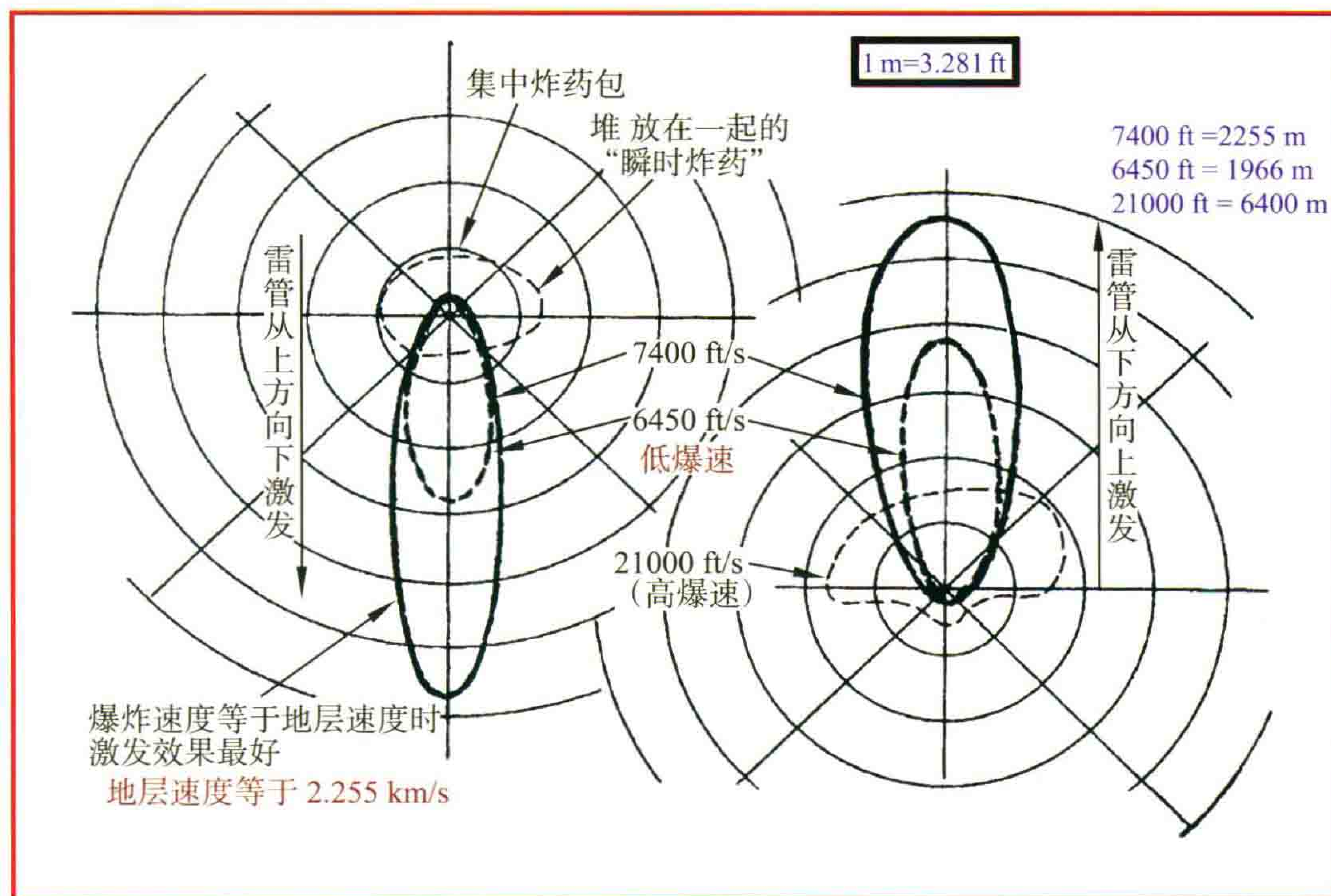


图2　长条形药包激发能量的极坐标表示图(S. M. Martner等)

先看左图，雷管从上方激发，集中药包基本上是一个点震源，所以各方向上的能量均匀散开，因此其方向特性接近一个圆形，绘在第一个同心圆附近(图中有些扁)。而长条形炸药包却表现明显的方向性，图中绘了两个长的椭圆形，分别代表爆炸速度等于7400 ft/s和6450 ft/s的两种情况。前者与地层速度相等，方向性最明显，向下的爆力(振幅)比向上的大20倍(即能量大400倍)。后者是爆炸速度等于地层速度的86%，向下的振幅比向上的大10倍左右(能量大100倍)。

右图是雷管在下方激发，此时炸药能量主要是向上的，它会造成很强的虚反射及激发更多的面波及折射波干扰。可惜这次试验的目的主要放在克服虚反射上了，并没有深入分析激发频谱的变化。

我因此也试做了一个理论计算，自编程序名Longchag. bas。该程序把一条长药包分成许多0.1 m的小药包，每0.1 m小药包以点震源用地层速度向外传播。下一个0.1 m药包按照爆炸速度作一定时间延迟，也以点震源形式，以地层速度作球面扩散。这样把长条形药包的波场不断地累加。

于是可以在第一个0.1 m药包爆炸后的40 ms或80 ms时间，得到一个Snap Shot波场快照。可以看到地震波向四面八方传开的波形，并根据波形振幅的极大值计算出按极坐标绘出其方向特性"玫瑰图"。

这次计算的思路是遵循图3所示“延迟爆炸”的基本原理。

这种“延迟爆炸”技术已经在工程地震中使用，并证实对集中炸药能量是有效的。

他们是采用几个小药包，用延迟导爆索相连而成的，我们是把长条形炸药理解为很多个小药包相连，连续向下爆轰的叠加效果。

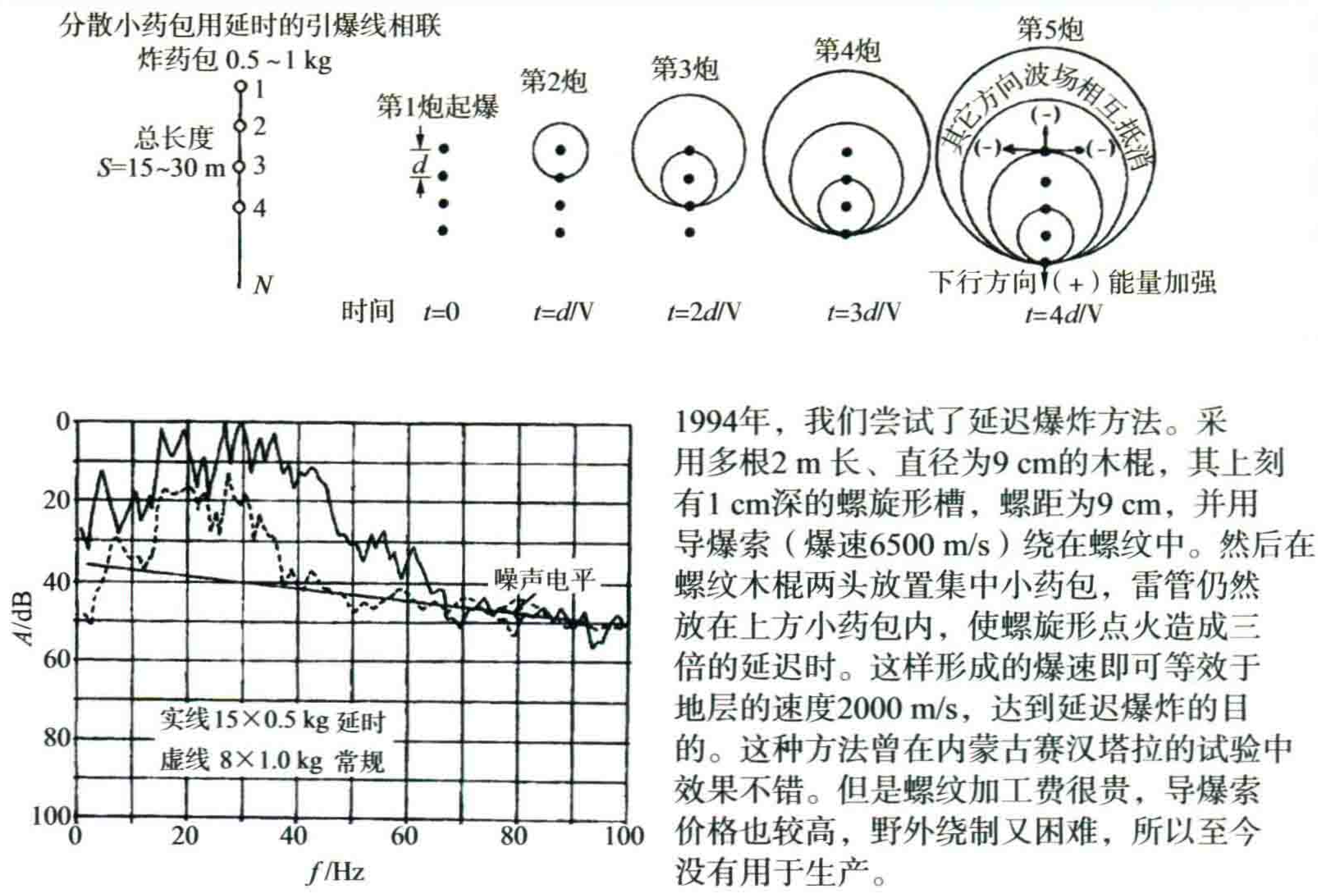


图3　延迟爆炸基本原理

整个程序在计算过程里采用了精确地根据非整数单位的爆炸延迟时间，不用四舍五入，直接代入李子波公式，求得精确的地震波形数据并不断加以累加。

注意，实际炸药爆炸的过程只有几个微秒，数学上只是一个激冲函数。因此在程序里在非整数采样点上无法画出其波形。所以我们程序使用了一个具有起始频率 F_0 参数的李子波来作计算。

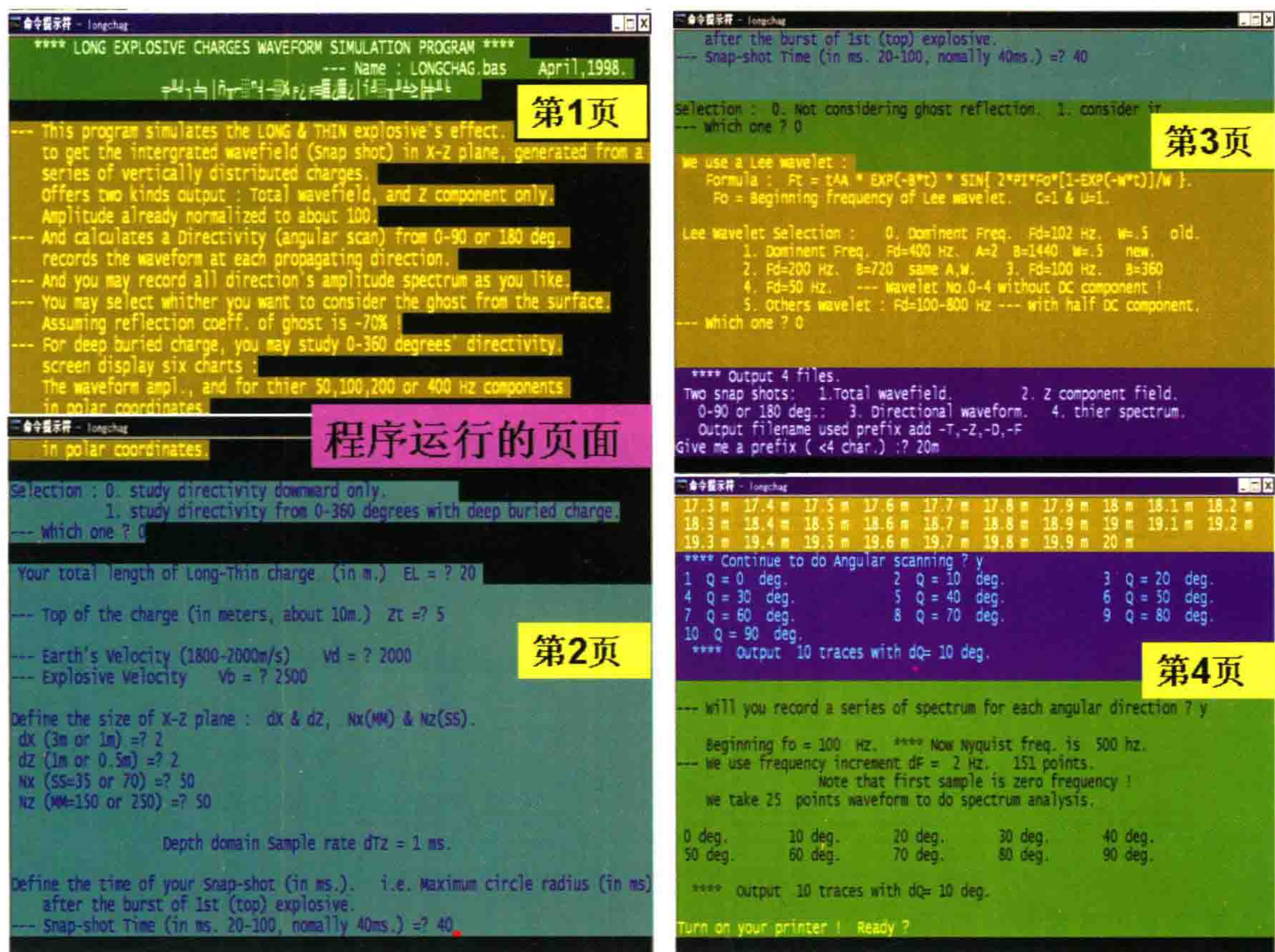


图 4　Longchag 程序运行的页面图

1. 试验 1——采用目前炸药爆速最低的 2500 m/s

20 m 长条炸药，埋深 5 m～25 m。

地层速度 2000 m/s，爆炸速度 2500 m/s，爆速地速比＝1.25，(目前炸药爆速最低只能到2500zm/s)。

此例只计算 0°～90°，向下空间。

雷管放在药包顶部起爆。

观察起爆后 40 ms 的 SnapShot 快照。

查看 0°～90°不同方位上的震动波形。

分析不同方位波形的频谱。

按不同频率分量，绘出爆炸振幅的方向玫瑰图(图 5)。

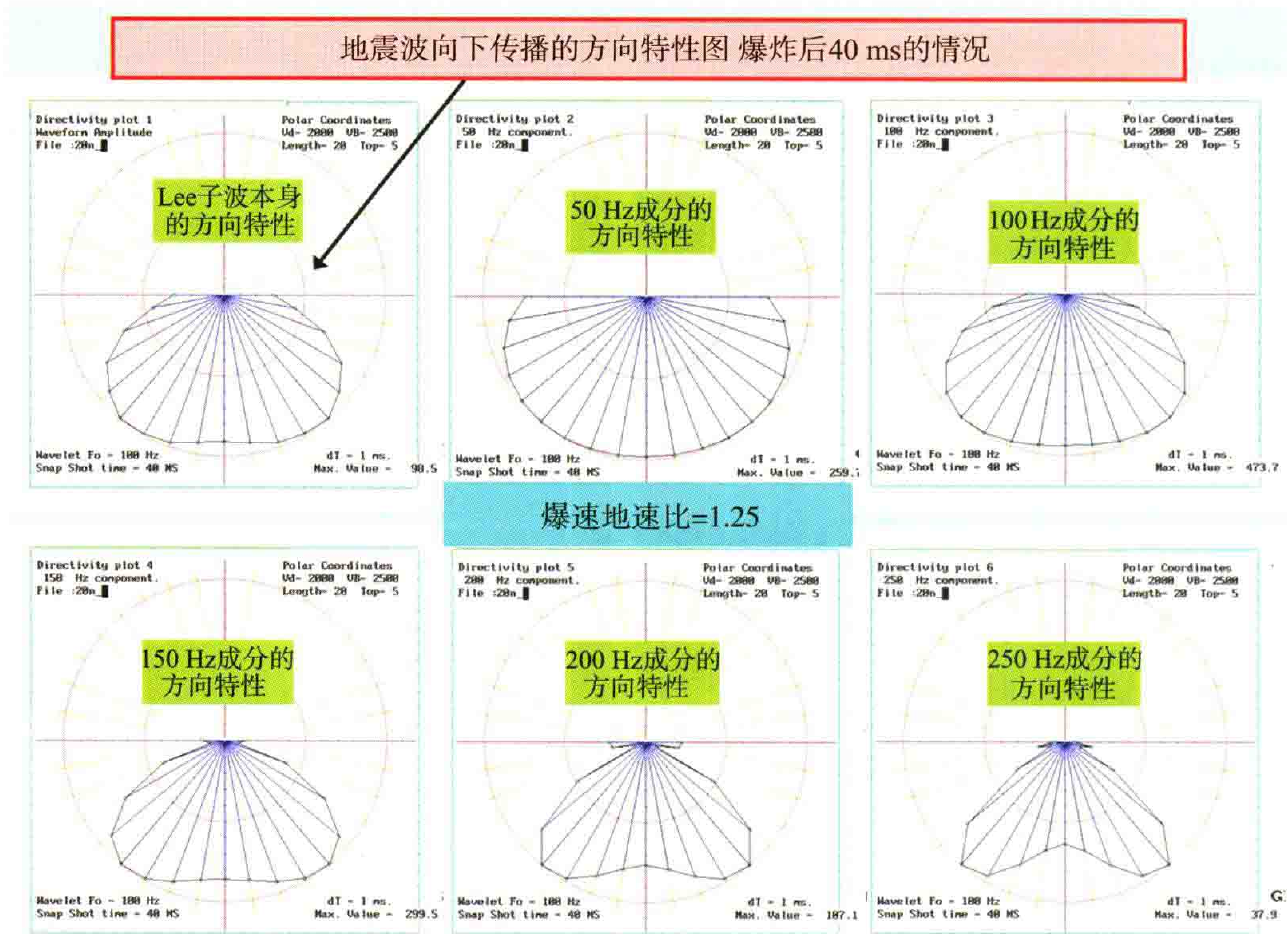


图 5 试验 1 不同频率分量爆炸振幅的方向玫瑰图

(1) 解释 6 张方向特性图(图 5)。左上方第 1 张是爆炸后,传播 40 ms 后,李子波最大振幅的方向特性。向右向下,分别是 5 张不同频率分量的方向特性。可见频率愈高,方向性愈强。

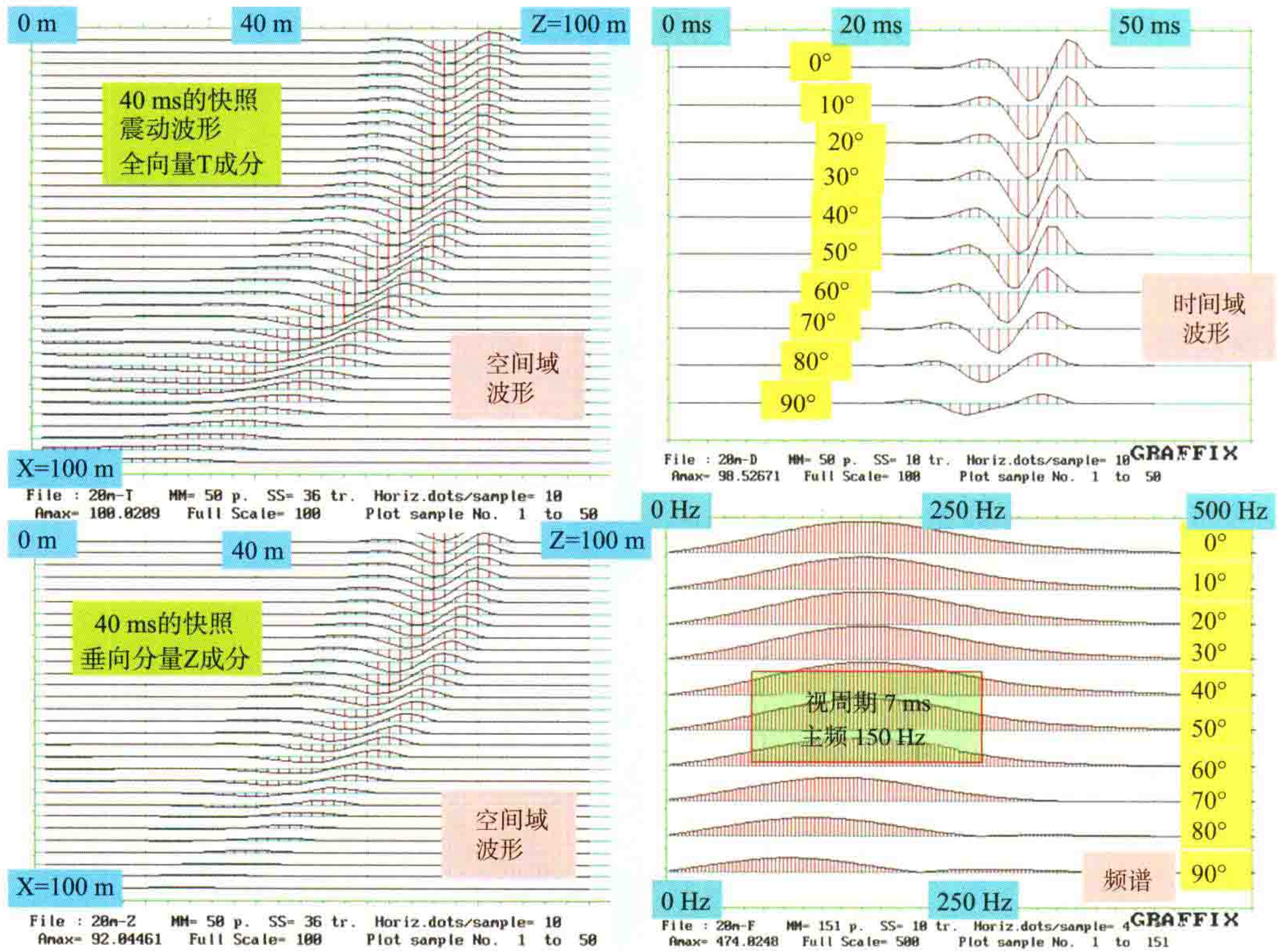


图 6 试验 1 李子波形及频谱图解释图

(2) 解释子波波形及频谱图的 4 张图(图 6)。左上方第 1 张是爆炸后,传播 40 ms 后,李子波在空间域全向量 T 的波形的 Snap Shot 快照。

注意,左边两图的横坐标是垂直距离!

左下方为李子波垂直分量 Z 的波形。

右上方是 T 分量的 cos 值。

右上方是 0°～90°各方向的时间域波形。

右下方是 0°～90°各方向波形的频谱。

李子波的视周期为 7 ms,主频为 150 Hz。

2012 年 12 月,我又改进了能计算 360°的方向特性的程序

2. 试验 2——爆炸速度等于地层速度

20 m 长条炸药,埋深 5 m,长 25 m。

地层速度 2000 m/s,爆炸速度 2000 m/s,爆速地速比＝1.0。

二者相等,方向特性最明显。

此例计算 0°～360°。

雷管放在药包顶部起爆。

观察起爆后 40 ms 的 Snap Shot 快照。

查看 0°～360°不同方位上的震动波形。

分析不同方位波形的频谱。

按不同频率绘出爆炸振幅的玫瑰图(图 7)。

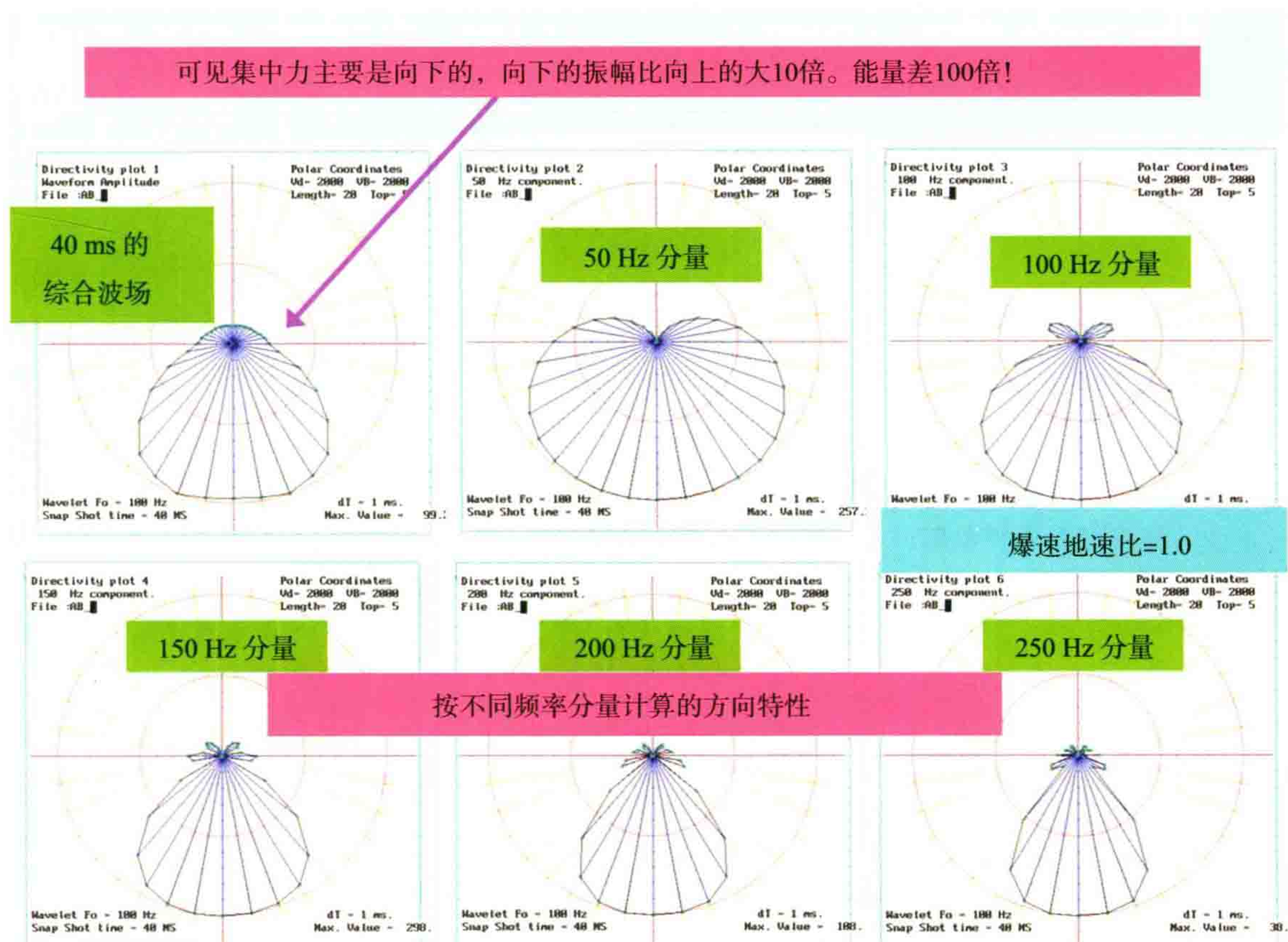


图 7　试验 2 不同频率分量爆炸振幅玫瑰图

小结 1

这左上角第一张图的结论和 Smatner 的野外试验是完全一致的。

只要爆炸速度和地层速度一致,即爆速地速比＝1.0 时,集中力最明显。向上和向下的振幅差 10 倍,振幅的平方是能量,所以,能量的 99%可以向下冲击。

这是以偏高频的李子波的形态来分析的。它的主频为150 Hz。当年Smartner是用距离为半径125 ft的几口观测井，用地震仪观察的爆炸波形，肯定是高频很丰富的。所以和我计算的结果是一致的。

小结2

但是当我们进一步分析分频带的情况。从图中各频率分量来看，频率愈高，方向性愈强。例如，200 Hz时，能量集中在向下0°～40°范围内，40°时，振幅由1下降到0.7；而50 Hz频率的图中，方向特性就不明显，90°时才下降到0.7。

因此，这个办法对工程地震搞浅层结构是十分灵验的。但是对于寻找石油的1～3 km深度上，主频30～40 Hz时，方向特性就不会很明显了。

小结3

关键是长条形炸药的长度和它的总爆炸延迟时。例如20 m长的炸药，若爆炸速度等于2000 m/s，地层速度也是2000 m/s，从顶上雷管起爆开始，到最下方的炸药爆炸，总爆炸延迟时是10 ms。

向正下方传播的地震波的波阵面是"同步相切的"，即波形是振幅同步相加的。而向上及向其他方向的波阵面不相切，互相干涉甚至抵消。抵消的程度决定于爆炸时差。10 ms的时差，对于200 Hz的地震波已经到达2个视周期，足以产生能量的抵消。然而，对于50 Hz的地震波来说，10 ms的时差仅仅是半个周期。能量抵消不足。这就是图8上方向特性不明显的道理。

小结4

然而，对于50 Hz的地震波来说，虽然能量方向特性不够好，但地震波向下传播还是主流，而向上传播的能量很小。从这点来说，长条形炸药还是具有防止能量向上的作用。这对压制面波及折射波的干扰波能量的产生是有好处的。

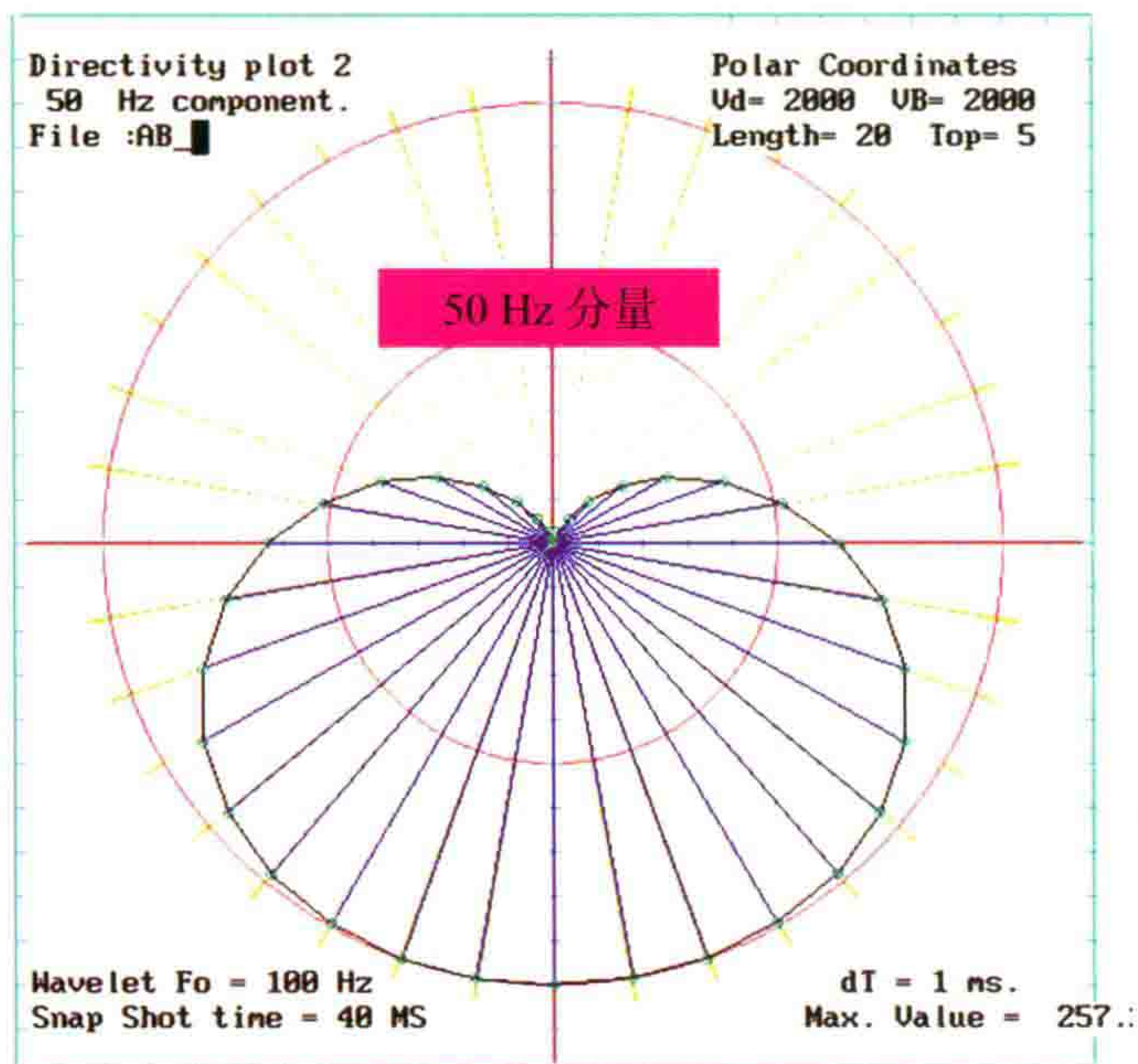


图8 试验2 50 Hz分量爆炸振幅玫瑰图

3. 试验3——看远场80 ms的效果

20 m长条炸药，埋深5 m～25 m。

地层速度2000 m/s，爆炸速度2000 m/s。

Snap Shot $t=80$ ms。

结果与$t=40$ ms的基本一样，见图9。说明方向特性基本不随时间的扩展而改变。

此例计算 0°～360°。

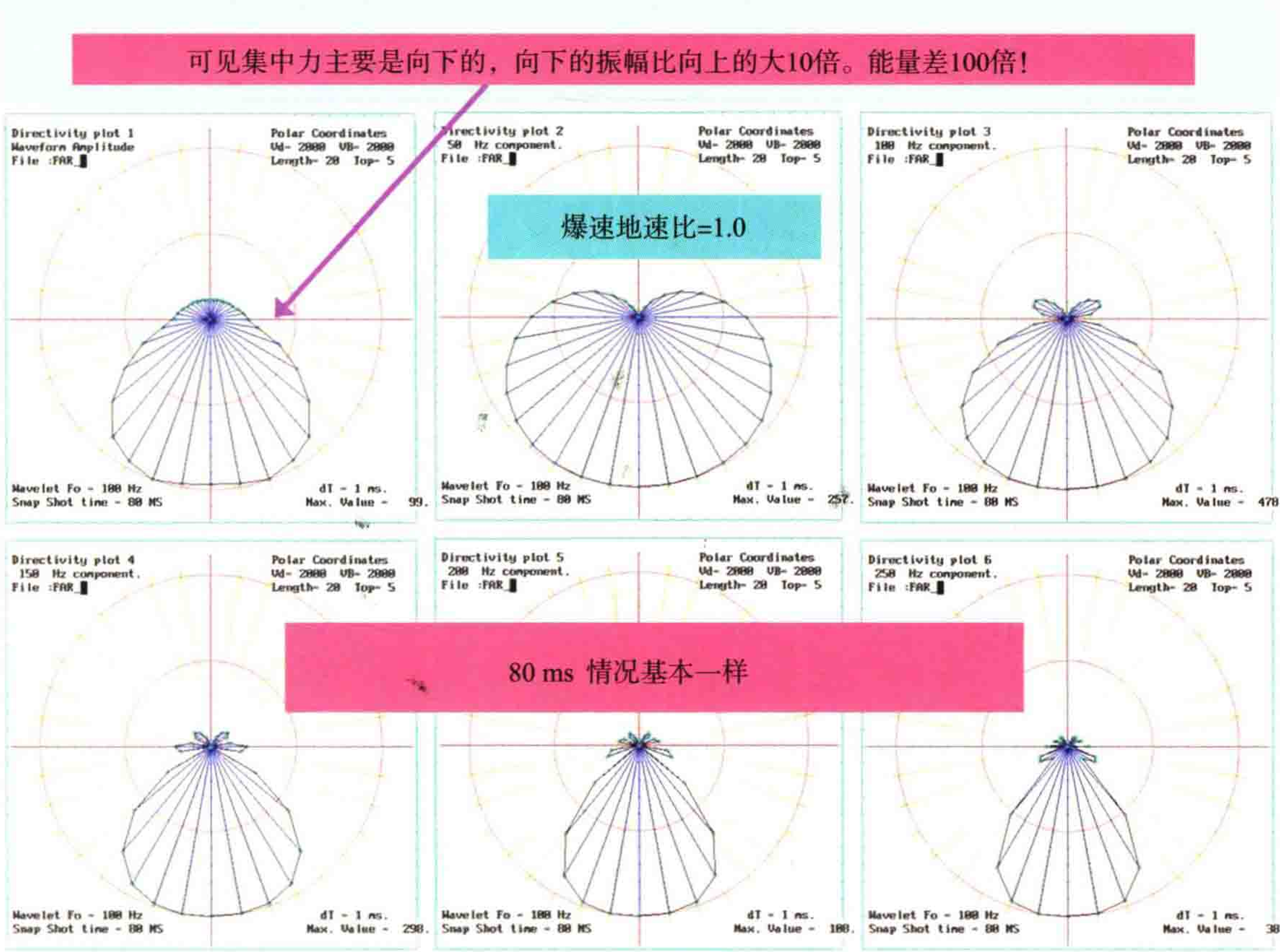


图 9　试验 3 不同频率分量爆炸振幅玫瑰图

小结 5

近场 40 ms 的波场的方向特性与 80 ms 的方向特性是一样的。这进一步说明，关键是长条形炸药的长度和它的总爆炸延迟时。时差不变，不同频率的方向特性也不会变。当然，这里没有考虑大地对地震波的高频吸收作用。

4. 试验 4——爆炸速度等于地层速度(提高李子波的起始频率)

提高李子波的爆炸主频，采用 $F_0=400$ Hz 的李子波。因为一般炸药爆炸时都主频很高。

实际炸药爆炸的过程只有几个微秒，数学上只是一个冲激函数。在程序里无法画出其波形。所以我们程序使用了一个具有 F_0 参数的李子波来计算，情况更好。

20 m 长条炸药，埋深 5～25 m。

地层速度 2000 m/s，爆炸速度 2000 m/s。二者相等，方向特性最明显。

Snap Shot $t=40$ ms。

此例计算 0°～360°。

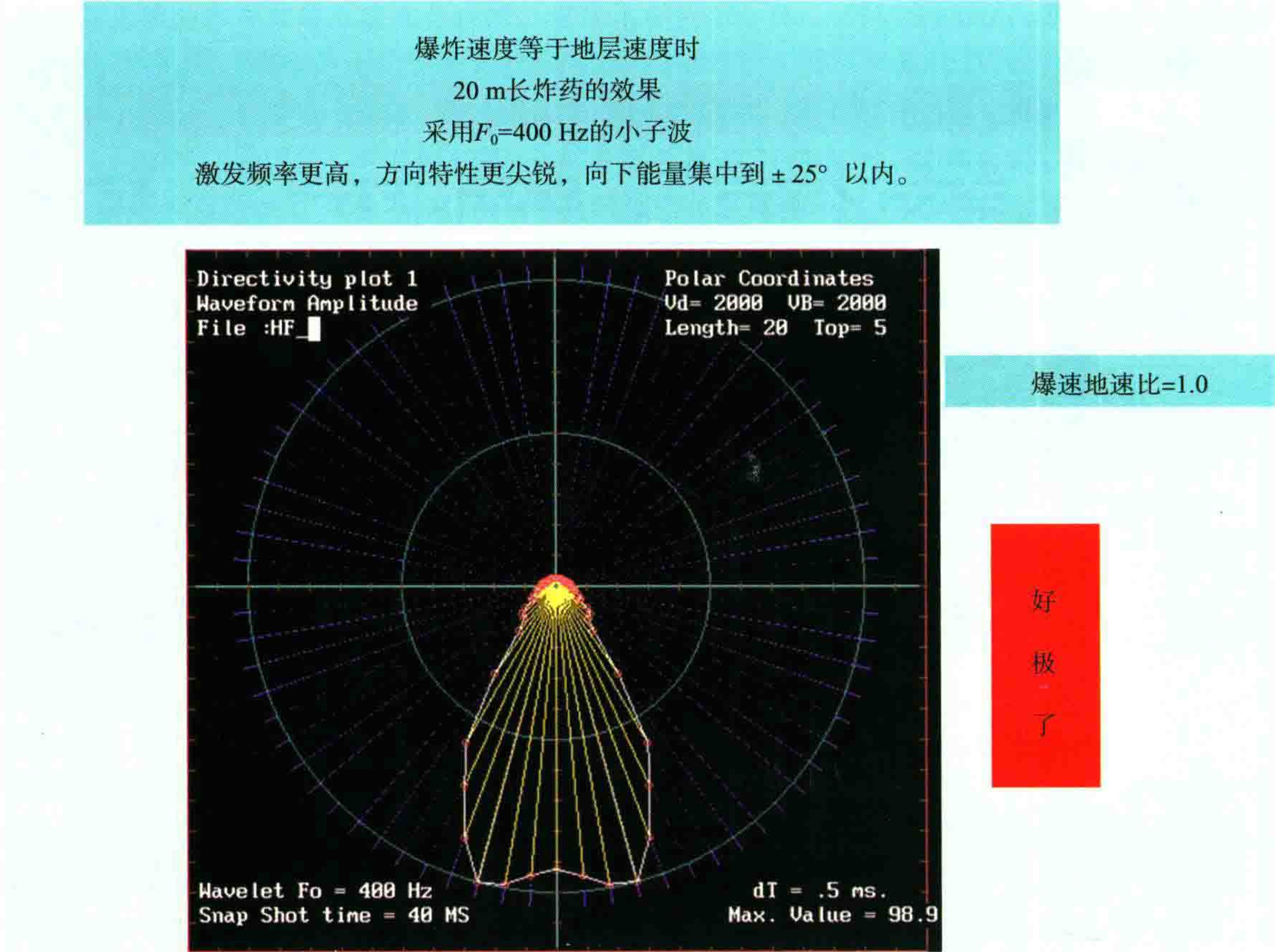


图 10 试验 4 400 Hz 李子波爆炸振幅玫瑰图

5. 试验 5——爆炸速度不等于地层速度时——低爆速炸药的效果

炸药长 20 m，顶深 5 m。

地层速度 1800 m/s，爆炸速度 2000 m/s。

爆速地速比＝1.11，它的倒数＝0.9 倍。

Snap Shot t=40 ms。

结果能量向下传播，方向特性也较好(图 11、图 12)。

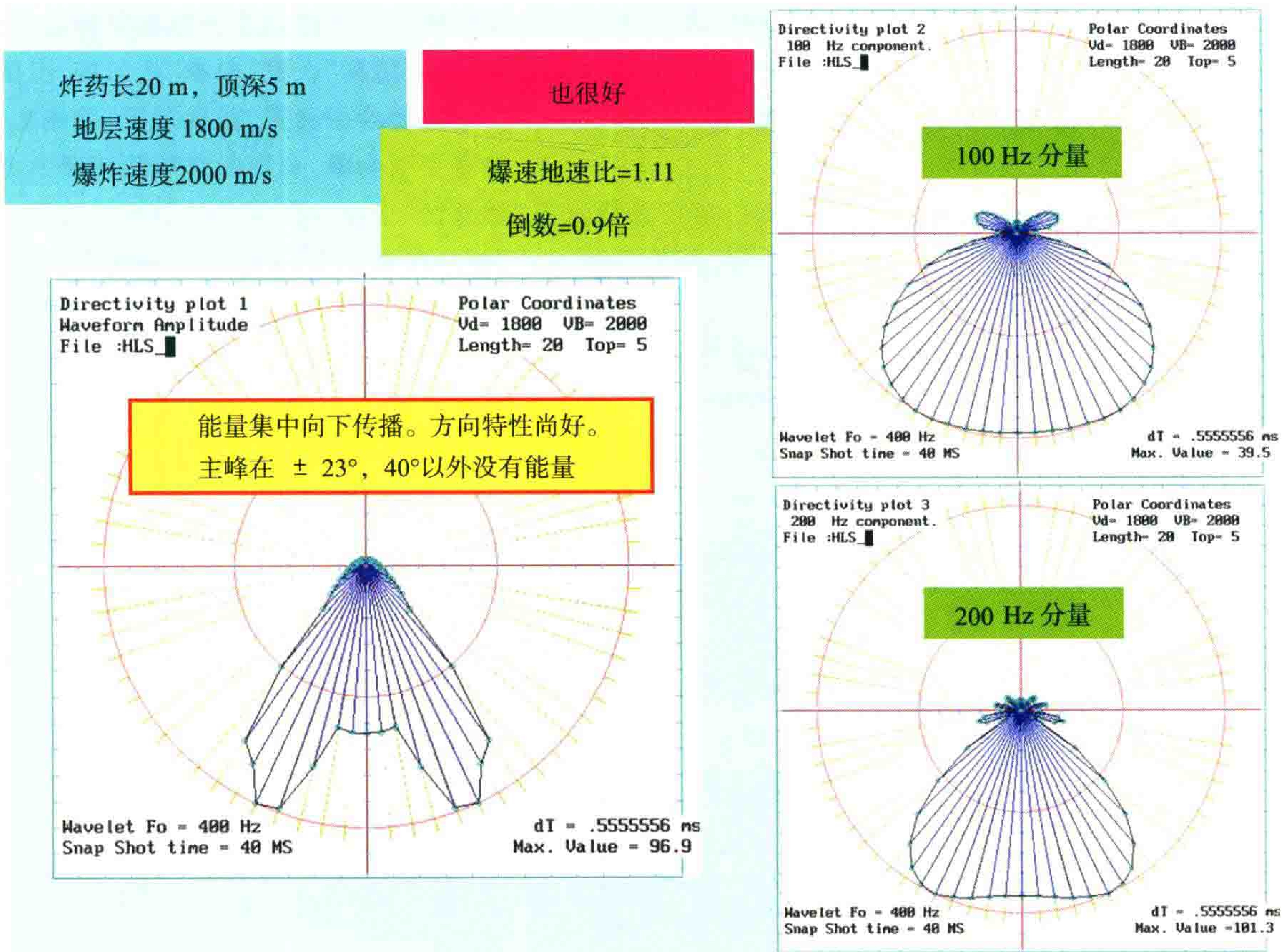


图 11 试验 5 不同频率分量爆炸振幅玫瑰图

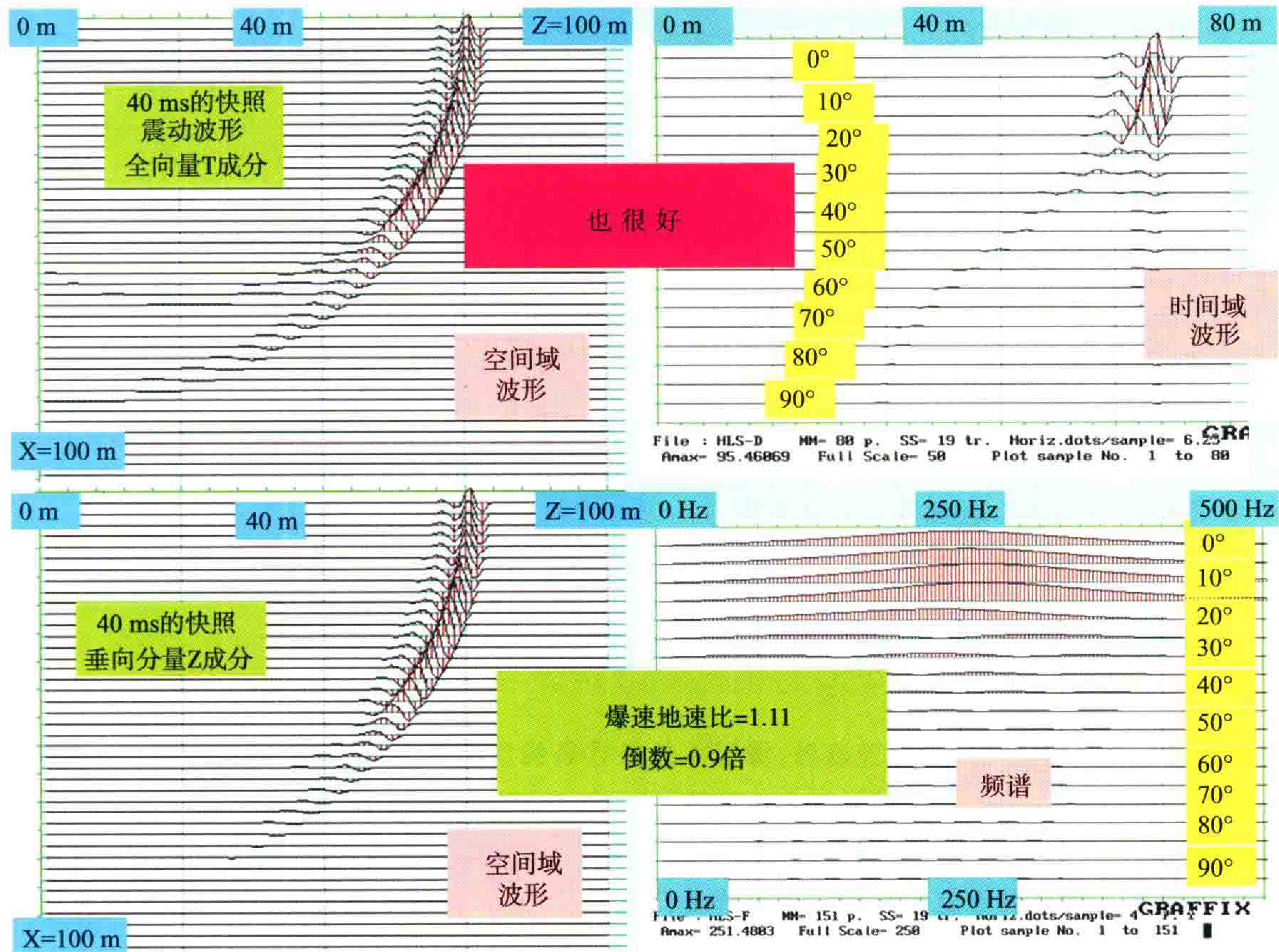


图 12 试验 5 李子波波形及频谱图解释图

6. 试验 6　爆炸速度不等于地层速度时，中低爆速炸药的效果

炸药长 20 m，顶深 5 m。

地层速度 1800 m/s，爆炸速度 2500 m/s，爆速地速比＝1.39。

Snap Shot t＝40 ms。

结果能量向侧向传播，方向特性就不好。

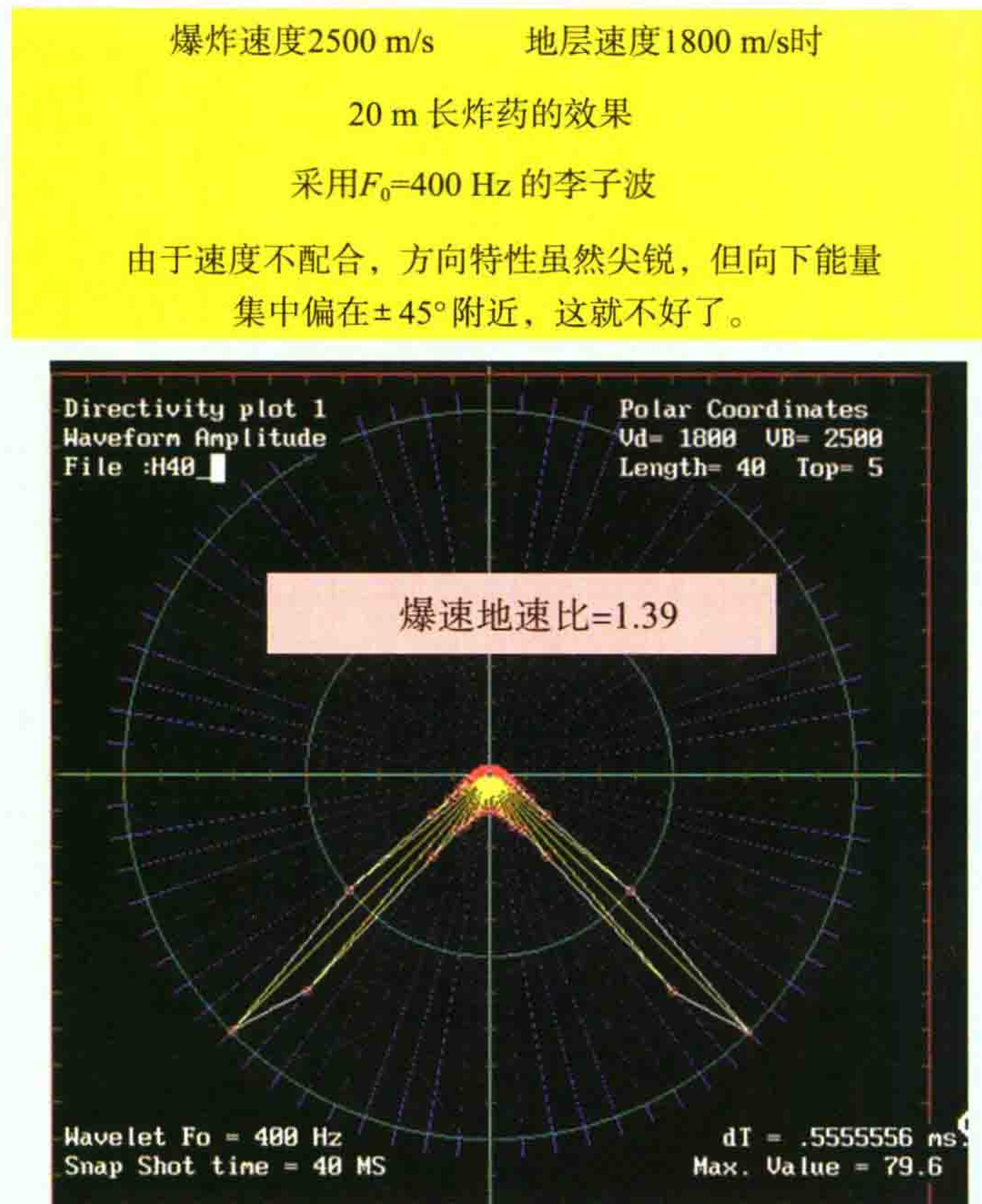


图 13　试验 6400 Hz 李子波爆炸振幅玫瑰图

- 爆炸速度与地层速度不相等时，向下传递的波阵面就不能相切而互相加强。
- 这个相切的条件的好坏由整个炸药的长度的爆炸持续时间与地层速度的传播时间差所决定。
- 传播时间差 $dt=(L/v_d)-(L/v_b)$。

L 是炸药长度，v_d 是地层速度，v_b 是爆炸速度。

- 要求 dt 小于 3 ms，就可以达到具有较好的方向特性，也就是以上“爆速地速比”接近 1.0 误差在 10%以内的效果。

二、结论

只有当爆炸速度接近等于地层速度时，雷管在长条炸药的顶部激发，才能获得向下集中力的好效果。爆速地速比＝1 最好，允许误差在 10%以内才有效。

目前我们的炮井一般都在地表第四系地层中潜水面下激发，其速度为 1650～1800 m/s。要制造爆炸速度等于 1700 m/s 的炸药是极困难的。目前炸药厂只能生产 2300 m/s 的低爆速炸药，不能再低。这与我们第四系的 1700 m/s 差距太大。这是第一个困难。

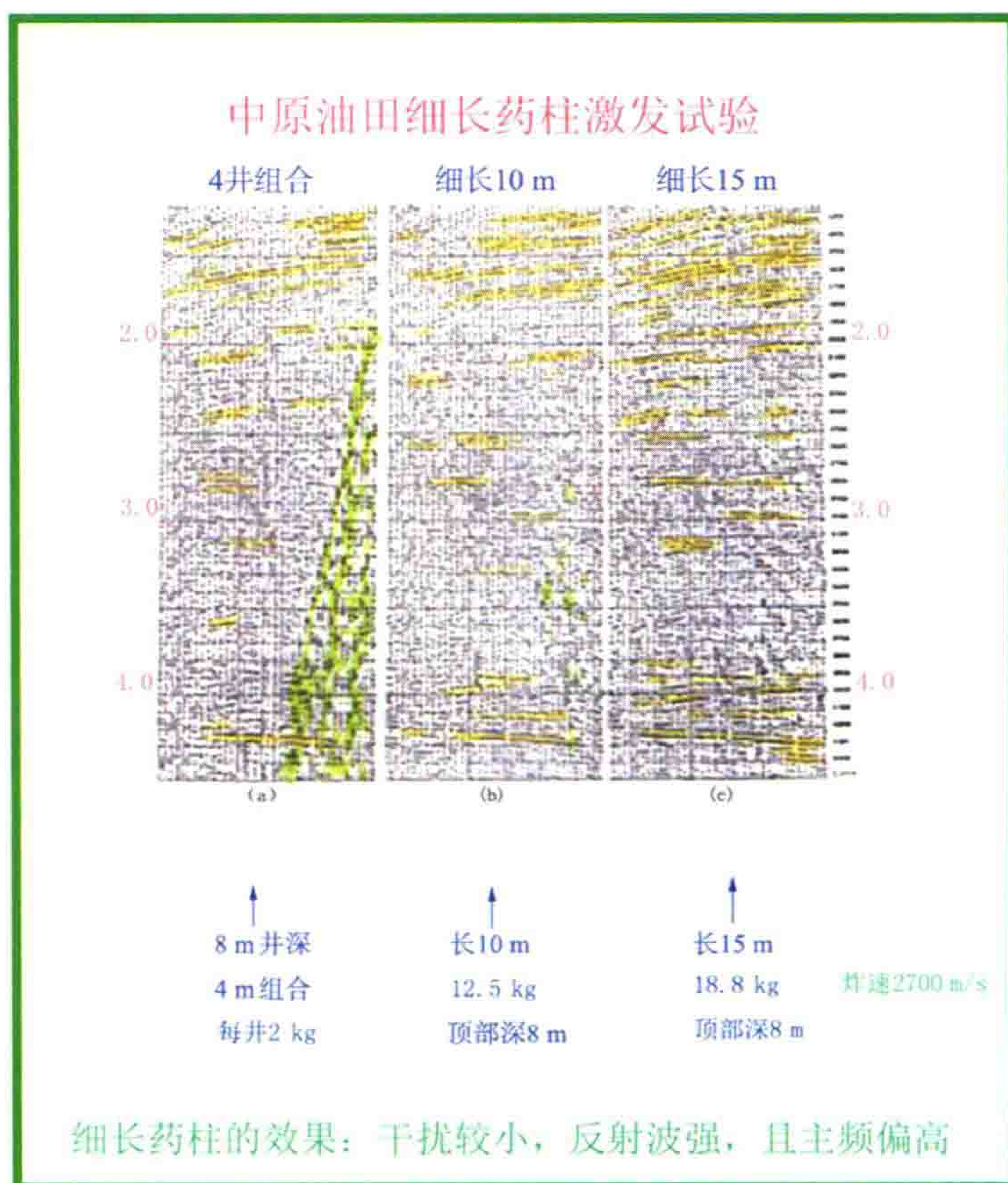
第二个困难是出厂的低爆速炸药的实际真实爆速很不稳定。究其原因主要如下。① 所谓低爆速炸

药，是将普通爆速的炸药混合一定比例的黑火药，它的爆速低（500 m/s）。为追求低速，这样混合的炸药爆炸不稳定，有时由“爆炸”变为“爆燃”，我们看到井口冒黄烟，效果就很差。② 出厂的所谓炸药爆速是指在“无约束条件”下的爆速（用纸袋包装在空气中爆炸）。然而，实际爆速它随包装材料的不同，炸药的直径不同及含水情况及井径的情况，都会产生变化。

经我们在现场用炸药两头绑上“时断线”用地震仪测定，所谓 2300 m/s 爆速的药，由以上几个因素的制约，实际爆速从 1771 m/s 可以变到 2675 m/s，变化多端，很难掌握。

由于以上的原因，我们试验的效果很不稳定。

我们在内蒙古及中原油田的试验中，细长药包有时得到较好的效果，见图 14。



效果好的例子

图 14　中原油田细长药柱激发试验

但是，有时它并没有效果。如塔北地区，据现场的同志告诉我，塔里木的试验经常看到爆炸后，井口冒黄烟，是低爆速炸药的爆燃现象（图 15）。因此，我们最后放弃了。

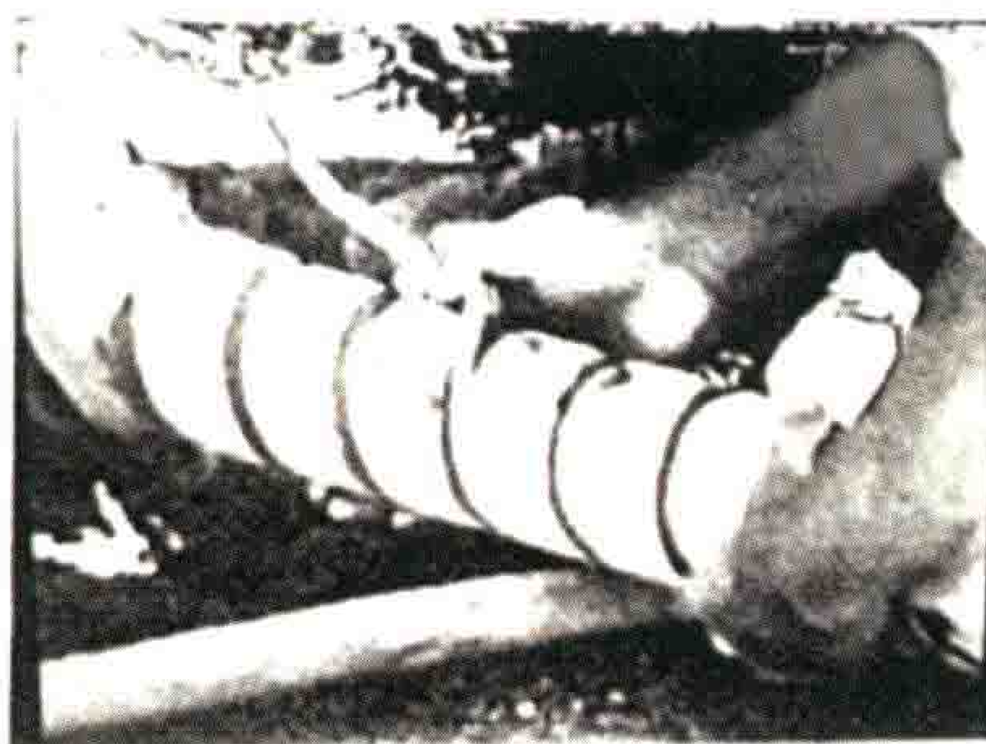


效果差的例子

据现场的同志告诉我，塔里木的试验里经常看到爆炸后井口冒黄烟，这是低爆速炸药的爆燃现象。

图 15 塔里木低速爆炸试验

回顾 1994 年我们尝试了螺旋形导爆索延迟爆炸方法(图 16)，想起长条形炸药的另一种用途——克服浅层火成岩的能量屏蔽作用。



螺旋形导爆索
在包装

1994年我们尝试了螺旋形导爆索延迟爆炸方法。采用多根2 m长、直径为9 cm的木棍，其上刻有1 cm深的螺旋形槽，螺距为9 cm，并用导爆索（爆速6500 m/s）绕在螺纹中。然后在螺纹木棍两头放置集中小药包，雷管仍然放在上方小药包内，使螺旋形点火造成3倍的延迟时。这样形成的爆速即可等效于地层的速度2000 m/s，达到延迟爆炸的目的。这种方法曾在内蒙古赛汉塔拉的试验，效果不错。但是螺纹加工费很贵，导爆索价格也较高，野外绕制又困难，所以至今没有用于生产。

国外在20世纪80年代也曾经出现过多种螺旋形导爆索点火的专用爆炸柱，后来多因为加工成本过高而无人使用了。

图 16 螺旋形导爆索延迟爆炸方法

这只是一种设想，尚需进一步试验证实，有几个难点。

（1）螺旋形柱缠绕导爆束后，当螺距很小时，会不会产生螺距之间的“殉爆”现象？“殉爆”距离是多少？

（2）塑料成型的螺旋管柱管中要不要灌水或装沙子？

（3）当地层中有火成岩时，如何调整爆炸速度，使它接近地层速度？

我国海南岛福山凹陷浅层第四系有很多层状的玄武岩。造成对反射能量的屏蔽。临界角在27°左右，造成炸药的能量主要去产生折射多次反折射干扰波，有效波难以下传。

如果使用螺旋柱绕导爆索的长条形低爆速炸药，控制爆速地速比＝1.0，见试验5。就可以把爆炸能量控制在±27°以内，避开了临界角，并加强集中向下穿透的反射能量。

这里我们不必顾虑爆炸的低频分量的方向特性不好。因为这里是为了减少火成岩屏蔽效应，是属于爆炸波的近场效应。在浅层几十米的范围内，地震波的爆炸子波的频率肯定是相当高的。因此，方向特性应该是很好的

火成岩的屏蔽现象可以用 Zoeppritz 公式作理论计算，见图17。这里假设火成岩的纵波速度为4000 m/s。

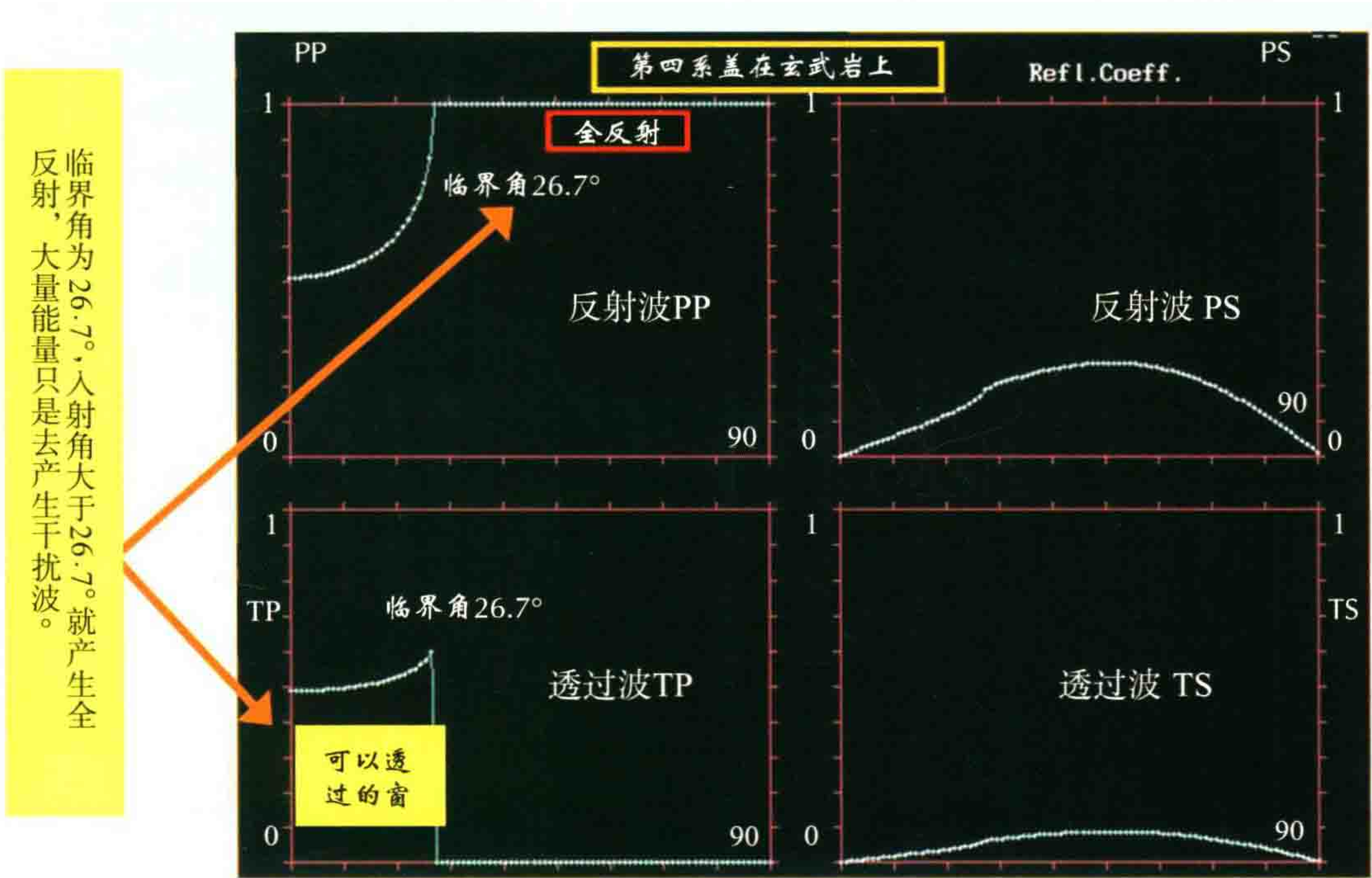


图17　根据 Zeeppritz 公式的计算结果

这是理论上说明了其可行性，值得一试。不过要通过炸药试制及野外一条测线的考验。

第四系地层的炮井里的地震波传播速度经常有些变化，尤其是当其中有火成岩夹层时，为了适应地层速度的变化，爆炸速度也应根据微测井资料，作相应的调整。

可以向工厂定制2～3种不同延迟时间的螺旋形导爆索延迟爆炸管。每管长度为1.5～2 m，第1种爆炸速度是1600 m/s，第2种是2500 m/s，第3种是4000 m/s；于是总长度为20 m的十几个延迟爆炸管，就可以用不同数量的3种速度的管子搭配起来，形成与地层速度基本匹配的炸药串，达到具有良好方向特性的爆炸。

结语

低爆速长条形炸药的试验实践已经历经了较长的认识过程，到目前为止，大家还没有形成共识。

今天在修改《高分辨率地震勘探的误区与对策》一文准备出版时，我对问题重新作考虑，以及用新的程

序作了一些计算后，再次认为低爆速长条形炸药对工程地震是极有效的措施。但对勘探油气的 1～3 km 深度处，由于反射波主频偏低，方向特性就不好了。

所以，《高分辨率地震勘探的误区与对策》一文中，关于低爆速长条形炸药的效果应该有所保留。它有效果，但是不稳定，不可靠。

然而，长条形炸药可能解决有些表层火成岩发育地区的激发能量难于穿透问题及显著降低面波和折射干扰波强度的难题。

文章编号 309-1



对地震勘探的分辨率、信噪比与保真度的再认识



文中再次提出分辨率及信噪比实际上是由“信噪比谱”所决定的。(所谓信噪比谱就是把每个频率成分中信、噪各占多少百分比，在频率域做一个全面分析。)

要争取一个好的分辨率的实质，就是要在信噪比谱里争取一个较宽的“有效频带”(所谓有效频带就是通过分频扫描，信噪比大于 1 的那些频带)，“有效频带”愈宽的才是真的分辨率高。

此文 1994 年 4 月发表于《石油物探信息》，作者李庆忠。

摘　要

本文对地震勘探的信噪比、分辨率及保真度三个重要问题做了初步探讨，引出了对什么是好的地震记录，什么是好仪器和怎样做好地震反演的讨论意见，供大家参考。关于这些意见的详情讨论可在 1993 年作者编写的《走向精确勘探的道路——高分辨率震勘探系统工程剖析》一书中找到。

前言

高信噪比、高分辨率及高保真度三者是衡量地震资料好坏的重要标准，大家熟悉地把它们称为“三高”。然而，对这三者的正确理解却还存在着不少问题，值得我们加以讨论和深化。例如，过去大家对信噪比简单地理解为在地震记录上信号的振幅与噪声振幅的比值。这个理解也对，但是不全面，需要更正。因为这只是一种“视觉信噪比”，它在不同的处理因素的不同频档上这种信噪比是可变的、不固定的。

过去大家对分辨率的理解只是简单地认为垂向分辨率约等于 1/2 视周期，或者厚度分辨率等于 1/4 视波长。这种理解很实用，但也不全面，搞不好有时会出现“视分辨率”和“假分辨率”。

关于保真度的认识更是缺乏衡量标准。

因此，如果“三高”讨论不清楚，那么，“什么是好的地震记录”、“什么是好的接收仪器”、“什么是好的成果剖面”以及“地震反演该怎样作”等重要问题也就说不清楚。

当前，地震勘探技术的发展方向正在朝着不断提高其精度的道路前进。在石油勘探方面，就是要进一步提高地震勘探的分辨率，使储层预测及储层描述工作得以建立在更扎实的基础上。那么，对“三高”作深入一步的讨论便有着重要的意义。

一、“信噪比谱”和“有效频宽”的基本概念

分辨率及信噪比实际上是由“信噪比谱”所决定的(所谓信噪比谱就是把每个频率成分中信、噪各占多

少百分比，在频率域作一个全面分析）[1]。

要争取一个好的分辨率的实质就是要在信噪比谱里争取一个较宽的“有效频带”（所谓有效频带就是信噪比大于1的那些频带），“有效频带”宽的，才是真的分辨率高。

光作一维频谱分析是说明不了分辨率的实质的。因为你不知道较宽的频带里，它们到底是信号还是噪声。二维FK频谱稍好，但是也往往得不到时空域中的细分概念。

“分频扫描”是检查信噪比谱的最好办法。该方法是以大致1个倍频程左右的频域间隔，从低频到高频逐步提升频率、对单炮或CDP集作分频滤波扫描。这种分频扫描最能直观地判断信与噪在全频谱上的分布特点（能见到同相轴影子的就是其信噪比大于1），并且用它能够分析信号与噪声各自在不同频档中的表现。

直接计算信噪比谱的办法也有，例如，可以通过计算地震道相邻道的两两互相关及自相关的基础上，推算出整个频率域的信噪比谱。[2]

对于“信噪比”及“分辨率”二者，我们过去的理解在概念上要加以修正。这二者只有在全频谱的范围里才能正确地认识它，并正确地加以定义。

必须建立起“有效频宽”“信噪比谱”“视觉信噪比”及“视觉分辨率”等基本概念，才能指导勘探实践。

二、“视觉信噪比”及“视觉分辨率”的基本概念

任何频率褶积滤波及任何反褶积运算都不会改变每一个频率成分中固有的信噪比[1]。因为傅里叶变换不认识谁是信号、谁是噪声，它只是“一视同仁”地对输入信号放大其某些频率成分，压制某些频率成分，并相应地改变其相位角。于是在滤波或反褶积之后，如果被放大的频率成分的信噪比高些，输出剖面就好看一些，整齐一些，这便是“视觉信噪比”高了些。

如果被放大的频率范围宽一些，剖面的“视觉分辨率”就高一些，看起来波形瘦些。但如果高频端信噪比较低的那一部分给放大了，剖面就变得很乱，这便是“视觉信噪比”又降低了。

所以其实褶积滤波及反褶积运算都不会改变每一个频率成分中固有的信噪比。整个“信噪比谱”是不会改变的。只是你想突出哪一种频率，就会给你带来视觉上的差别而已。

当代的反褶积技术，可以轻而易举地把频谱展宽，但展宽以后不等于分辨率真的提高了。因为高频端和低频端原始信噪比低于1的部分振幅提高以后，它们只起破坏作用。所以，真正能够展宽的频带范围还是我们所谓的“有效频宽”的范围，不会再比它大，再大的部分是假分辨率。

所以，我们应该根据信噪比谱的实际情况，使反褶积后让有效频宽那一段突出地放大，让无效的那些频段得到收敛。这样才能得到一种最佳的剖面，它在较好的视觉信噪比的基础上，争取了最佳的视觉分辨率。

结论是如果不作噪音压制工作，那么，“频率加强滤波”可以使你得到“扬长避短、量体裁衣”的最佳输出剖面。[2]因为该方法是根据信噪比谱的好坏决定其输出强度的一种反褶积方法。

三、“什么是好的地震记录”

“信噪比谱”的概念要贯穿在整个系统工程之中。从野外采集开始，就不能只看野外监视记录漂亮不漂亮。而必须通过分频回放，来看看它在多宽的频段上能够看到目的层反射同相轴的影子——这是衡量野外记录好坏的最终指标——即有效频宽有多宽。漂亮的监视记录不一定是好记录；相反，看起来有些乱的监视记录却不一定是坏记录。今后主要需用分频扫描来加以鉴定。

考察野外试验井深及药量时，也不能用一般的监视记录来作判断（它可能给你错误的结论），必须采用分频回放来作全面分析。尤其是在较高的频档上，看用什么井深及药量、其信噪比更好。有现场处理机

的单位，不要只看现场机的单炮记录好看不好看，应该让现场机作分频回放（或者至少作一些高频档回放）。这点很重要，例如药量大时，对高分辨率可能不是一个坏事[3]，药量太小往往压不过微震噪声，这方面已经有不少教训。

四、“什么是好的接收仪器”

仪器制造人员也需要搞清什么是高分辨率系统工程对地震仪器的要求。

不同的检波器及不同的地震仪器接收来自地下的反射信号时，都等于将大地的原始振动作一种褶积滤波后再输出。这种褶积滤波也是不会改变每一个频率成分的信噪比的。它们记录下来的单炮记录也是一种“视觉信噪比”和“视觉分辨率”。

有人使用了高频（或涡流）检波器，或者提高了前放滤波的低截频后，野外单张记录的主频提高了许多，但回室内处理之后，发现与过去的剖面却没有原则的差别，十分困惑。其实根本的道理在于他们没有去调查信噪比谱。如果表面上主频偏高的记录在分频回放后，高频端并没有把高频噪声压下去，那么，单炮上监视记录的主频偏高也是没有用的。

有人看到采用了高频检波器或涡流检波器之后，面波基本没有了，于是十分高兴，以为面波被克服了。其实这样的资料只要在室内通过低频档 AGC 回放，面波又会赫然呈现出来。

因此，如果不是弱信号到达“死亡线”（－60 dB）以下，那么，所有不同仪器、不同的检波器所记录的东西到了室内通过“谱白化”处理后，它们将会得到基本一样的资料结果。

这句话并不是为了语出惊人，吓你一跳，而是逻辑的推理和实践的结果。我通过理论记录也已加以证实了。

地震仪器（包括检波器）的任务是“忠实地”记录下大地的振动波形。但是仪器本身是不知道这个波形是信号还是噪声的（当然，50 Hz 交流噪声及某些噪声是可以用仪器来克服的。然而大部分噪声尤其是随机噪声是记录仪器本身无法加以克服的，也不是它的职责范围）。所以，信噪比谱的低劣主要不怪仪器的好与坏，而主要是施工设计者和施工者的功过。

用仪器来识别干扰波的办法目前还不成熟。有一种加拿大试制的 Omniphone 万能检波器是一种野外实时处理的三分量检波器，它可以用三个振动分量的波形求出质点的振动轨迹，从而采用极化滤波器来压制面波。这种设计有它可取之处：首先，它可以使面波压制 12～18 dB；其次，它是三分量接收的，可以了解反射波来自何方，从而在资料处理时取得类似于宽线剖面的效果；最后，它每道只用一个检波器，初至起跳干脆，有利于作好折射静校正，并且不会有由组合引起的高频衰减。

但这种万能检波器的价格十分昂贵，每个检波器要 3000 多美元，并且笔者认为它对高分辨率勘探起不了多大的作用。因为我们的主要敌人其实不是面波，而是高频随机干扰。高频干扰的粒子振动方向是垂直地面振动的直达横波，它们也不是极化滤波器所能识别和加以克服的。还有一点，我认为只用一个检波器的思路是错误的。因为地面接收时，因为相距几十厘米的两个检波器所接收的波形是不一样的，由于有干扰波存在，所以不用检波器组合就不能获得真正来自地下的反射信号（经过计算，只要组合总跨距不超过 10 m，那么高频信号直到 250 Hz，都不会产生明显的衰减副作用）。

那么，什么是仪器设计者需要努力解决的呢？什么是高明的仪器呢？这里不再赘述仪器的一般技术指标，只是想讨论一下当前高分辨率系统工程中的一个突出问题，即模数转换的瞬时动态范围问题。

五、模数转换的瞬时动态范围问题

总结了大地对地震反射波吸收的总规律之后，我们根据盆地的不同地层。计算出理论上的地震波衰减的分贝数。[1]其结果说明，大地吸收作用引起了高频反射信息的严重削弱。以 1.5 s 反射信号为例，在松

辽盆地中 160 Hz 的信号大致要比 10 Hz 信号削弱 66 dB(2000 倍);在华北地区,同样 1.5 s 的反射,160 Hz信号要比 10 Hz 信号弱 100 dB(100000 倍!)。

精密的电子放大线路可以把弱信号放大几十万倍,但是数字地震仪它却存在着一个瞬时动态范围不够的问题,即如果低频信号太强,它占据了全部有效的二进位数,高频信号就连最后一位也记不上。

解决这个难题有三条出路。其一是增加模数转换的二进位数目;目前广为流行的 24 位模数转换器是定点的,还不够好,最好有 24 位浮点的模数转换器。其二是在地震仪的模数转换之前先作频谱调整,即一定要提升高频,压制低频,使高、低频的输入电平差别不要太大,控制在 60 dB 的范围以内。其三是高低频分频接收的彻底办法。其实比较聪明的办法是第二种办法。

提升高频、压制低频的办法很多。采用高频(或涡流)检波器也有一定的效果,但它只有 6 分贝/倍频程的抬升。可控震源的非线性扫描及 SYSTEM-2 地震仪的频谱整形滤波器也只有 6 分贝/倍频程的抬升作用,它们都还不足以补偿地层对高频的吸收。

采用仪器内部提高前置放大器的低截频(F_1)是最有效的办法,它可以获得 24~36 分贝/倍频程的高频提升。

这里有一个概念需要转变:通常电子线路设计者都希望信号在"通放带"里(即频域中顶上平的那一段)"高保真"地进行工作,然而对于地震仪来说,实际上应该反其道而行之,顶上平的反而是坏事!我们应当在"低截频以下"进行工作,利用低截频以下的陡度来压制低频,相对地提升高频信息。

再说一下,这样做只是为了调整接收频谱,使地下来的高、低频信号同时能记录下来。至于记下来的是信号还是干扰噪音,地震仪是不知道的,也不是它的职责范围。

那么,作为仪器本身需要克服的噪声是什么呢?有,那就是:① 要降低仪器电子部件固有的"热噪声"换算到入口处的电压值。这个电压值很小,一般为 1~2 μV。TI 公司做得最好,为 0.5 μV,再小就困难了。② 关于克服 50 Hz 工频干扰,现在有了不少性能优良的陷波器。陷波频率需要随市电频率的波动而有自适应能力。此外,如果 50 Hz 干扰仅仅比有效波强三五倍以内的情况,其实不应该在野外采用陷波器,只要在室内用"频率域去野值"的方法,就能彻底加以消除,并且还不至于对 50 Hz±2 Hz 的成分产生不良的后果。3. 另一种来自大线电缆的天电、电磁感应噪声,它们却是不可忽视的噪声。电缆愈长,噪声愈大。为克服此类噪声,最好的办法是"遥测数传"。必须在检波器附近立即用采集站作模数转换,才能克服此类干扰。

检波器及地震仪的谐波畸变问题也在一定程度上会影响高频信息的真实性,应逐步加以改进。

最后再加一句:如果野外施工中高频噪声大于高频信号,那么任何仪器与检波器的改进都是白搭,好仪器与坏仪器的结果就基本相等。

六、野外采集施工中的主要薄弱环节

当前高分辨率地震勘探的主要薄弱环节是野外采集施工中的高频噪声没有得到应有的注意和加以克服。人们往往只想到如何采用高明的仪器来获得高分辨率,而没有注意到施工中的风吹草动的高频环境噪声却是我们主要的敌人。于是常常发生高频噪声的强度大大地超过了地下来的中、深层反射信号的高频信号电平,使高频信号淹没在强噪声之中,以致室内处理也救不过来。

通过最近的研究,这种高频随机噪声的传播速度甚低,(仅 100~250 m/s),视波长极小,只有几米,但强度不小。因此,刮大风时不应该继续施工,要严格监视放炮前的微震水平,并且加强小面积的、极小组内距的多检波器组合。尤其要注意改善埋置条件,方能奏效。

七、资料处理中应该注意的问题

在资料处理中有不少影响信噪比和分辨率提高的因素。

首先，单道反褶积是不可取的，它会造成各道地震子波的不统一。[1] 静校正及动校正的精度也是决定分辨率高低的重要因素，必须用信噪比高的“优势频档”来作静校正与速度谱的迭代。

要改善“信噪比谱”必须作去噪。实际上，你去噪的本事有多大，就能使最终剖面的分辨率有多高。

但是，去噪不是一件容易的事。第一，它要满足两个前提，即“波形统一”和“时间对齐”。只有当有效波在各道上的时间对齐了，才能动手去噪，否则只要动、静校正稍有误差，去噪的过程中就会损失高频信息。然而波形统一又是时间对齐的前提，反射波子波的波形不一致(例如陆上激发接收条件的变化，引起波形发胖)，对于胖、瘦不一致的子波波形是根本谈不上时间对齐的！所以，陆上的资料要用两步法反褶积，首先统一其子波波形。

第二，必须分析清楚干扰波的性质和其特点。这最好是通过分频扫描来了解它们在不同频带范围上的分布特点。

在资料处理中，对于低频端的强面波和强折射波最好不要采用简单的高通滤波。因为，这等于把有用的低频信息也全部铲除掉了。最好是采用“内切滤波”的“外科手术法”，它只去除强面波所占范围内的低频部分，留下高频信息，并且在内切时窗之外保留所有的信息。

对于折射规则干扰最好采用模型减去法，先求得规则干扰的模型，再减去这个模型，并且加以迭代改进。

随机噪声是一种十分顽固的敌人，它最麻烦的特性是在任何域中它都与信号难分难解。不管在 $F\text{-}K$ 域、$X\text{-}T$ 域、$\tau\text{-}P$ 域，甚至 kL 变换域及双曲线拉东变换域中，随机干扰永远有一部分与信号特征完全相似的部分——这部分可称作“假信号”，它是很难去掉的。目前克服随机噪声的方法主要还是靠统计压噪规律，即$\sqrt{N}$的规律，N 是参加运算的道数。而 $F\text{-}X$ 域预测去噪(RNA)是一种较好的办法，因为它基本上不受地层倾角的限制。

想要克服随机干扰噪声是必须付出代价的，即你必须部分地牺牲横向分辨率，或者牺牲振幅的真实性。在地层倾角不大，断层不多的地方，在空间采样率足够密的工区里，牺牲一定的横向分辨率以换取垂向分辨率的改善是完全可取的。俄国的 CDA 时间场共反射点面元叠加法，就是利用这个原理获得了很高分辨率的剖面(在西西伯利亚 2 s 左右的反射主频达到 120 Hz)。

但牺牲横向分辨率又不能做得过头，做过头后会造成断点模糊及“蚯蚓化”现象发生，所以资料处理人员要掌握分寸。

八、“真分辨率”“视分辨率”与“假分辨率”

在搞清分辨率与信噪比的基本概念的基础上，可以将地震勘探的分辨率划分为三大类，即“真分辨率”、“视分辨率”与“假分辨率”。

真分辨率是地震勘探本身所达到的分辨率，它以有效频宽来衡量(即信噪比大于 1 的那些频段的宽度)。

视分辨率是一种追求地震有效频宽以外的努力和尝试，例如，SLIM、DELOG、L1 模反褶积、伯格反褶积及频域拓宽方法等。它们能够获得有效频宽以外的、详尽的薄层信息，但它们只是对地下情况的“猜测”和“估计”。它们是多解的，答案可以有一百个、一千个。可能对，也可能不对。

近年来发展的各种新的反演方法，包括波恩反演，模拟退火法，分维、分形方法以及采用物种进化理论的遗传算法等，都不能解决这个多解问题。

笔者用理论模型论证了频带有限的带限子波在其通带以外不可避免地具有多解性，即其高截频以上的信息永远是不确定的。高频端有差异的不同反射系数序列会得到严格一样的、没有差别的合成地震正演记录。

所以，“薄层问题”的反演是永远解决不了的！

其实地震道的高频端的数据如果都是零,倒也好了。可惜我们的实际地震记录的高频端常常以噪声为主,于是在地震资料的反演中,其高频信息非但求不准,而且是数学上愈精确的方法,其反演结果就愈糟、愈假!

因此,笔者认为:"地震勘探本身所没有达到的分辨率,不可能通过什么高明的数学方法来获得解决。"不少反演方法可能只是某种"数学游戏"而已。

笔者推崇一种"宽带约束反演",这种反演就不是仅仅靠数学方法来猜地下的高频信息,而是借用测井资料丰富的高频信息作为已知的约束条件,从而推算井旁的地震数据的合理反演结果。它使测井资料与地震数据互相取长补短,达到较为合理的反演结果。这种方法其实也还是视分辨率。离井愈远,其反演的可靠性愈差,但毕竟是地震与测井结合的最佳猜测。

所谓"假分辨率",就是一种表面上看起来视频率较高,但不是真的有效频带的加宽。因此,只是一种假象,不解决实际问题。请大家注意,分辨率是不能人为地制造的。滤去低频,或者一味地突出高频的做法,并不是有效频带的加宽,相反地却是频带更窄了,频谱分析能够加以证实。

此外,值得注意的是如果有效反射波并没有时间对齐,或者各道子波的波形也不统一,那么反复地作去噪及反褶积,也会造成"假分辨率",这种情况会看到明显的"蚯蚓化"短同相轴泛滥的现象出现。

九、关于"高保真度"问题

"高保真度"也是我们所追求的目标,它直接牵涉到波阻抗反演结果的准确性,但是大家对它研究得不多。笔者认为,目前大家对保真度都处于可以理解而不可言传的状态之中。

例如,我们所有的地震资料处理模块中,除了"解编"之外,几乎没有一个模块是不改变振幅的,就连简单的一个球面扩散补偿,都对保持真振幅会产生影响。那么,保真度到底以什么来衡量呢?保真的客观标准是什么?保真度以什么来定义?

这些问题笔者尚未找到答案,尚处于"糊涂"的阶段之中,这也是我们地震勘探基础理论研究不够的一个领域。只有一点是大家比较认识统一的,那就是小时窗的、单道的强化 AGC 是不可取的,只能少量用作剖面显示,不能用在处理流程之中,把振幅取对数或者开平方的模块也不能保持振幅。其他的就很难说清楚。例如,动校后组合不一定是不保持振幅的,反褶积和谱白化处理因素不合适也会失去保真度。倾角相干加强用适当的参数也可以基本保持振幅。

"相对振幅保持"的提法是正确的。因为我们地震资料的解释主要靠的是(相邻道之间的,横向的)对相对振幅的判断,所以,只要相对振幅保持好了似乎就行。但是如果要研究波阻抗,地震道时间域纵向上的相对振幅不保持,也会使作波阻抗反演得到不准确的答案。

当前有些模块被公认为"保振幅的",有的称为"不保持振幅"的,其实还都带有一定的盲目性。已经发现这样的例子:有些剖面原始资料质量不太好,可是用户又要求采用"保持振幅"处理,结果许多本来有效的模块不敢使用,最终造成出站剖面信噪比很差,分辨率也不高。这种教训是不少的。

最近笔者做了一些理论试验,发现不同的"谱白化"处理参数也会严重地改变振幅的保真度,并且过分白化以后,波阻抗反演的结果也会产生某些频带的振幅失真。甚至可以提出新的问题:"谱白化的基本思路是否正确?""什么样的谱白化才能保留反射系数的信息而不是模糊这种信息?"。

所以,笔者去年在《走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析》一书中对高保真度作了些保留,看来问题还有待于我们进一步深入作探讨。

最后我想,可能保真度应该这样来衡量与定义:它的最终目标是反演波阻抗后与地下波阻抗形态一致,只差一个比例因子,这样就算是高保真,校正了这个比例因子以后的相似系数便是"保真度"。处理中途各模块的保真问题,都要服从这个最终目标。这个思路不知道对不对?

关于"三高"问题的讨论,无疑是十分重要的。希望大家对此提出宝贵的意见、并加以批评指正。

参考文献

〔1〕李庆忠. 走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析[M]. 北京:石油工业出版社,1993.

〔2〕俞寿朋,查中圻,梁杰. 频率加强滤波[J]. 石油地球物理勘探,1984(3):200-209.

〔3〕俞寿朋. 高分辨率地震勘探[M]. 北京:石油工业出版社,1993.

文章编号 309-2

地震勘探分辨率与信噪比谱的关系

——答云美厚《地震分辨力新认识》一文



关于地震勘探的分辨率，历来存在争议。瑞利准则本来是从光学仪器的分辨率借用过来，有它的不合理性。

云美厚、丁伟两位同志在《石油地球物理勘探》2005 年 10 月载文对我书中关于信噪比与分辨率的关系提出质疑。他们认为 1/4 视波长是分辨率的客观标准，而且分辨率与信噪比是无关的。

针对他们的这些观点，我写下此文，进一步澄清了分辨率与信噪比的关系，指出瑞利准则不适合于我们地震勘探，并提出对地震分辨率的概念要在对砂层预测的成功概率的基础上来认识问题。

此文 2008 年 4 月发表于《石油地球物理勘探》第 2 期，作者李庆忠。

摘　要

云美厚、丁伟曾对笔者专著《走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析》一书中阐述关于分辨率与信噪比有密切关系的论点提出质疑，他们认定地震分辨率只与地震波的主频有关，而与地震波的信噪比无关。笔者认为有必要对这个问题进行澄清。对同一地震资料而言，在不同的处理阶段其反射波的主频不是固定的，尤其是通过反褶积或者高通滤波的处理，人们可以轻易地把高频端的振幅谱提起来，即主频可以变高。如果没有噪声，通过脉冲反褶积可以把子波压缩成接近一个窄脉冲，可使分辨率达到任意高。可见，认定地震分辨率只与地震波的主频有关的结论是不正确的。此外应看到，地震分辨率是由地震数据的有效频宽决定的。

关键词

地震勘探　分辨率　主频　信噪比谱　有效频宽

《石油地球物理勘探》于 2005 年第 5 期上刊登了云美厚、丁伟的《地震分辨力新认识》一文[1]（以下简称《新认识》）。该文对我在《走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析》[2]一书中阐述关于分辨率与信噪比有密切关系的论点提出质疑。因此，我认为有必要对此加以进一步澄清。

（1）《新认识》一文，重新引入有些外国人使用的“分辨率（Resolution）”与“分辨力（Resolving power）”两个概念，这无助于勘探地球物理的具体分析工作。要知，外国人对有些技术术语的叫法未必是合理的，我们不必照抄。例如，外国人将“子波”与“小波”统称为“Wavelet”，这是很糟糕的，而我们中国人把它们分开翻译，以示区别，这样很好。同理，外国人对“Resolution”与“Resolving power”两个概念原本就说不太清楚，我们又何必非要采纳“分辨力”的说法呢？

（2）《新认识》一文认为，地震分辨率等于地震波 1/4 视波长的准则是客观存在的一个标准，并且认为

地震分辨力与信噪比无关,这是极不恰当的。

视波长是由地震信号的主频决定的。对同一地震资料而言,在不同的处理阶段其地震波的主频不是固定的,野外原始记录的主频一般最低,随着不同的处理环节,主频也在不断改变。那么,《新认识》文中说的客观存在的分辨力所依据的主频到底指哪一个主频? 大家知道,通过反褶积或者高通滤波,人们可以轻易地把高频端的振幅谱提起来,即主频就可以变高。如果没有噪声,通过脉冲反褶积可以把子波压缩成接近一个窄脉冲,也就是说分辨率就可以任意升高,此时只取决于采样率的大小。

以上事实表明,有关地震分辨率与信噪比无关的认识是不符合事实的。我认为,造成这种错误认识的根本原因,可能在于"新认识"的作者没有明白"信噪比谱"的基本概念。

如果"信噪比谱"很理想,即"有效频宽"(即信噪比大于1的那些频率成分)很宽,那么人们可以把子波的视周期通过反褶积将其压缩成接近一个窄脉冲,分辨率就可以变高。但请注意"滤波和反褶积都不改变每个频率成分的信噪比"。人们通过反褶积虽然可以轻而易举地把高频提升起来,但提升后的高频成分如果信噪比小于1的话,非但不能提高分辨率,反而造成地震剖面面貌变乱,或者说制造了"假分辨率",导致波阻抗反演结果的错误。

因此,一般的处理人员为了不让地震剖面变乱,提升高频端的幅度只能适可而止,子波也就只能压缩到某一个程度就不能再改进。由此可见,限制着分辨率提高的主要因素(或障碍)是高频端的信噪比谱,也就是说,我在《走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析》一书中表达的概念是基本正确的,地震勘探的分辨率大小必然与信噪比谱有关联。

(3) 现今,人们看到的原始单炮地震记录及处理过程中的地震剖面,直到最终的偏移剖面,都是地震资料在某一个频档上的表现形式,**人们看到的都只是"视觉分辨率"与"视觉信噪比"。在最终成果剖面上,只有当频档刚刚展宽到"有效频宽"时,才能获得最佳的"视觉分辨率"与"视觉信噪比"。也就是说,地震剖面的实际分辨率是由它的"有效频宽"所决定的,** 而有效频宽又可以通过"分频扫描"对它进行具体分析。这也是我们所提倡的和人们普遍应用而行之有效的一套分析方法。

可能《新认识》的作者认为信噪比谱是看不见、摸不着的东西,似乎在问如果知道哪儿是信号,哪儿是噪声,就说明信号和噪声是可以分离开的,于是就不会在信噪比的公式中再牵涉到信噪比了。其实(包括Widess在内)在信噪比的公式中牵涉到信噪比谱只是一个理论的表达,并不意味着他已经准确知道了信噪比谱。我在文献[2]中的理论分析也是采用已知的信号加上已知的噪声模型道所得的结果。此结果有理论上的指导意义。

诚然,求准信噪比谱不是一项容易的事。过去人们使用互相关除以自相关的办法求取信噪比谱,精度不是很高。1993年我们提出采用"分频扫描"的方法就可以直观地判断各频带范围的信噪比,后来为我国物探界普遍使用。我认为这是分析信噪比谱,确定"有效频宽",以及判断记录好坏的最重要的标准。

此外,《新认识》的作者可能对资料处理不熟悉,仅从解释人员手里的剖面来认识问题,于是便认为剖面上有一点噪声不要紧,主频起主要作用。

(4) 关于分辨率的定义,近年来大家争论比较多,过去文献上说的"Resolution"及"Resolving power"都是人们生硬地照搬光学仪器的分辨率及分辨力而得来的。瑞利准则使用了两个雷克子波相隔一个过零点距离相加的办法,这实际上不能代表一个砂层的厚度,因为砂层顶和底的反射系数是相反的,相加时应该把第二个雷克子波振幅倒过来。而对光学望远镜,人们只要求它能把两颗星分开就行,没有正、负之分。可见,研究地震勘探的分辨率比研究光学仪器的分辨率要复杂得多。

在实际应用中,大家发现1/4视波长的定义已经不能说明问题了,所以,我在2006年出版的《岩性油气田勘探——河道砂储集层的研究方法》一书第六章中作了详细讨论,表达了我对分辨率的观点。**主要的意思是,两个雷克子波相加的做法不能解决我们地震勘探面临的砂泥岩互层的条件下表达分辨率的问题。**[3]

有时候地下1 m厚的砂岩是可以识别的,而在砂泥岩互层的条件下,有的30～50 m的厚砂层组却由

于前后子波的相互干涉反而识别不出来。所以，我认为应当从统计概率的角度来认识地震勘探的分辨率的定义，唯一的办法是通过砂泥岩互层理论模型的测试，来分析分辨率是什么情况。笔者通过大量理论模型的测试，得到一个初步结论：**垂向分辨率的定义以1/8视波长为最合适，此时在砂泥岩互层的条件下，波阻抗反演对砂层分布的推断有70%以上的符合率。如果定义垂向分辨率为1/16视波长，那么波阻抗反演的符合率要大大降低。**

（5）在地震勘探中只有通过各种压噪手段，才能改变地震资料中某些频率的原始信噪比。但彻底地压制噪声是极困难的。各种压制规则干扰波的程序在压制干扰波的同时，也可能损害一部分有效反射波，例如 *F-K* 滤波就是这样。

提高地震资料分辨率的主要努力方向应是改进高频端的信噪比。高频部分的干扰波往往具有随机干扰的特性，通常使用的RNA(FXDECON)是个强大的压噪程序，它可以把随机干扰压制到6～10倍，但是剩下来的1/6至1/10的部分就是“道间相干”的“假信号”。它们与真信号无法区别，难以在后续处理中消除掉。如果某一个高频范围的原始信噪比小于1/10，则一般在室内处理过程中是无能为力的。可见，通过室内处理的压噪手段想扩展“有效频带”的能力，也是有限的。有人说通过“三高”处理，可使3 s处的反射波主频达到100 Hz，这纯粹是在制造假分辨率。

当然，在改进RNA模块保留对高频信号的真实性方面，还是有很大潜力的，例如，国九英、周兴元的FX算子频域外推方法[1]及朱生旺的思路[5]还是很不错的方法，今后还应加以改进，这是拓展高频信噪比谱的一个正确途径。

以上请大家读一读，并加以批评指正。

参考文献

[1] 云美厚，丁伟. 地震分辨力新认识[J]. 石油地球物理勘探，2005，40(5)：603-608

[2] 李庆忠. 走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析[M]. 北京：石油工业出版社，1993.

[3] 李庆忠、张进. 岩性油气田勘探——河道砂储集层的研究方法[M]. 青岛：中国海洋大学出版社，2006.

[4] 国九英，周兴元，杨慧珠. f-x，y域随机噪声衰减[J]. 石油地球物理勘探，1995，30(2)：207-215.

[5] 朱生旺. 信号方向约束噪声压制[J]. 石油地球物理勘探，1996，31(3)：423-429.

文章编号 310



可燃冰的认识、思路及规划建议



2004 年 12 月我应邀参加在成都召开的一次天然气水合物调查的论证会，这是我的发言稿，后来稍加补充。

可燃冰，也称天然气水合物(Gas Hydrate)，本文简称水合物，是甲烷在低温高压的特定条件下在水中形成的晶格。它是未来能源可能的替代物，近年来受到各国的重视，纷纷投入科研力量，开展调查。我国也在东海、南海发现有水合物的储藏，并于 2007 年在南海直接从海底取样，获得了可燃冰。

然而，我们应该认识到，水合物的开发利用还有很长的路要走。

本文论述了水合物是一种极贫矿(水合物饱和度极低)，它是不断逸散、不断补充、动态平衡的一种分散状的矿床，极难开采。本文提醒我们要慎重对待，从长计议，并提出了改进地震勘探水合物的方法及改进钻井工艺方面的意见。

一、水合物的基本理论

对天然气水合物，我是一个初学者，认识很肤浅。

下面向大家汇报一下我对天然气水合物的一些感性认识，以及由此产生的思路和建议。

我的 ppt 的标题是“不断散失与不断补充的可燃冰——天然气水合物”“流动着(动态平衡中)的水合物”(Gas Hydrates in Dynamic Equilibrium Stream)，它的理论依据如下。

(1) 没有任何岩石可以阻挡天然气以分子状态扩散。在水合物里，甲烷分子以何种机理进行扩散尚不清楚，但在水合物上方，甲烷气一直在向大气中释放是不争的事实。放在密封瓶子里的甲烷，在几十万年后会逃之夭夭(图 1)。



图 1　密封瓶子里的甲烷在几十万年后逃之夭夭

(2) 水合物大多赋存于第四系疏松的新地层中，孔隙度达到 30%～40%，幸亏它与水分子结成较牢固的“笼状结构”，才不至于散失太快。但是客观上存在一系列因素，使甲烷气还是以一定的规模在扩散。不可能不扩散，即使在泥质岩中也是如此，只是泥岩隔层中扩散减慢而已。事实上在水合物上方合成孔径声呐(12 kHz)声波 SAS 及多功能声波多普勒水流测量仪 ADCP 都已观测到天然气扩散团，在海水中上升，见图 2。

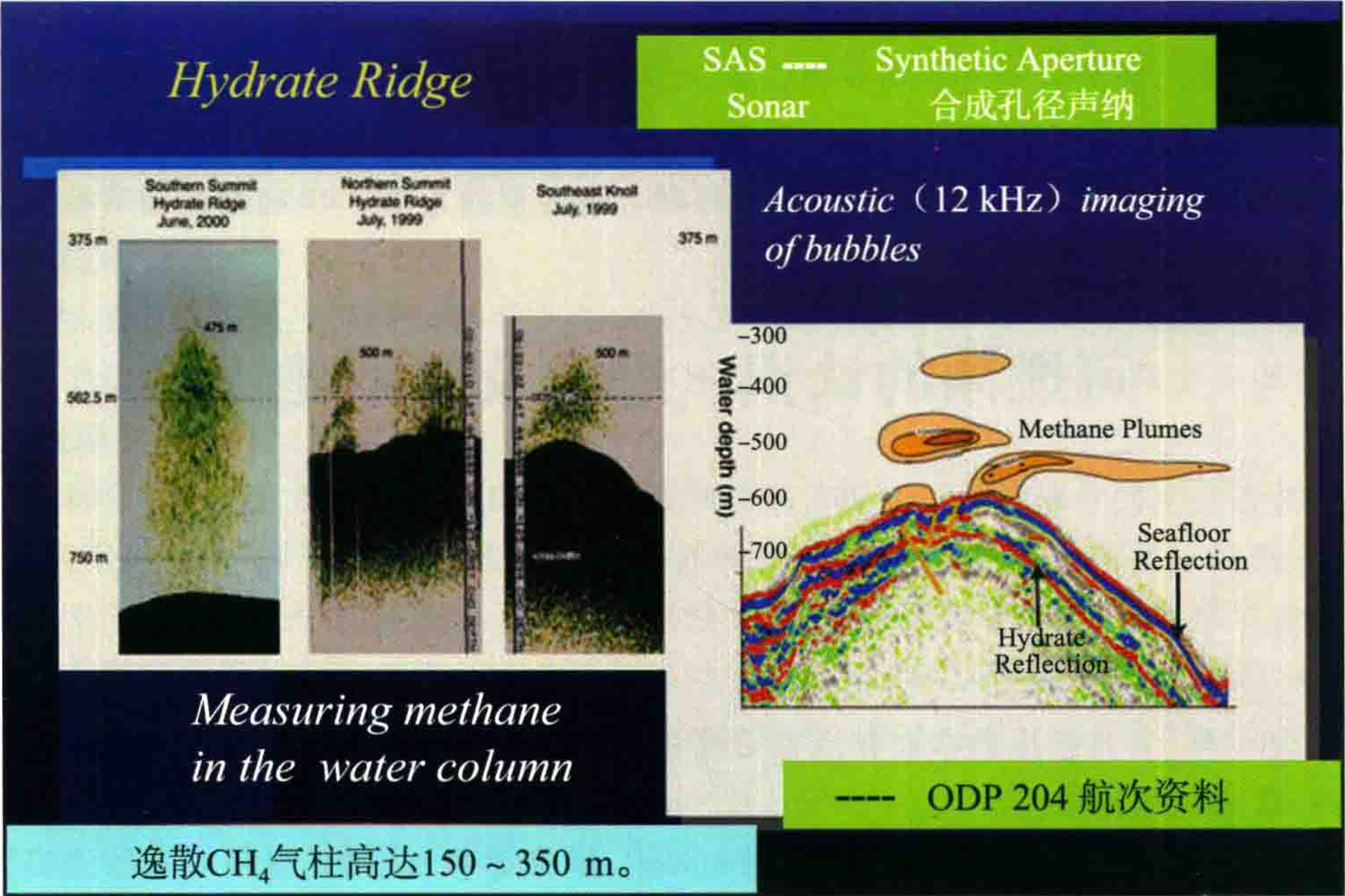


图 2 深海中水合物分布区上方的天然气不断向上逸散

根据 ODP 204 航次资料(李荣株《美国西海岸奥立岗海上 Offshore Origin》)

这几幅合成孔径声呐及多功能声波多普勒水流测量仪所发现的上升气体团在海中没有一直升到顶，显然甲烷气是一股一股地释放的，测定时，这一股尚未升到顶。

图 3 是低海平面时水合物分解产生的海底甲烷冷泉(引自金庆焕报告)。



图 3 低海平面时水合物分解产生的海底甲烷冷泉

有一个很短的视频可演示上图的气体强烈喷发的情景。

这个事实能进一步解释**为什么水合物中的甲烷饱和度如此的低，因为它始终处于不断散失与不断补充的动态平衡之中。**

从美国研究天然气水合物最深入的 Blake Ridge 的资料来看，通过钻孔及地球物理探测，所得到的天然气水合物的含量数据表示：水合物的浓度由下向上变小，最大的水合物含量才 8%。**因此，它是一种极贫矿，见图 4。**

在我国南海珠江口坳陷西部的文昌海区在 20 世纪 80 年代，打过几口井（如文昌 19 井等），发现了含气层，由于含气饱和度低，至今没有开采。

由于海上采气工程成本很贵，根据中海油总公司提供的数据：海上开采天然气的经济下限，以珠三坳陷为例，目前大致为：① 产量：大约 10×10^4 m^3/d；② 含气饱和度：大约 30%～40%；③ 储量：大约 100×10^8 m^3，否则采气不能收回成本。

文昌 19-1-1 井为 1984 年钻探，浅层亮点处确实发现天然气，但由于气层太薄且 CO_2 含量太高，无经济价值。目前与文昌 19-1 类似的发现天然气，但无经济价值的构造大约 8 个。

附注：有人说天然气水合物每立方米所含的甲烷为 164 m^3，似乎很多。其实，普通的天然气气藏埋深 1500 m、地温 120℃的时候，其体积系数也达到 170 倍左右（根据波义耳定律）。

目前在海上，一般认为含气饱和度低于 30%，就没有开采经济价值。所以，在大家一片对开采水合物的响亮呼声里，我们要保持理性的思考，既不放弃对它的研究，同时不能盲目乐观，过多地投入资金与人力。

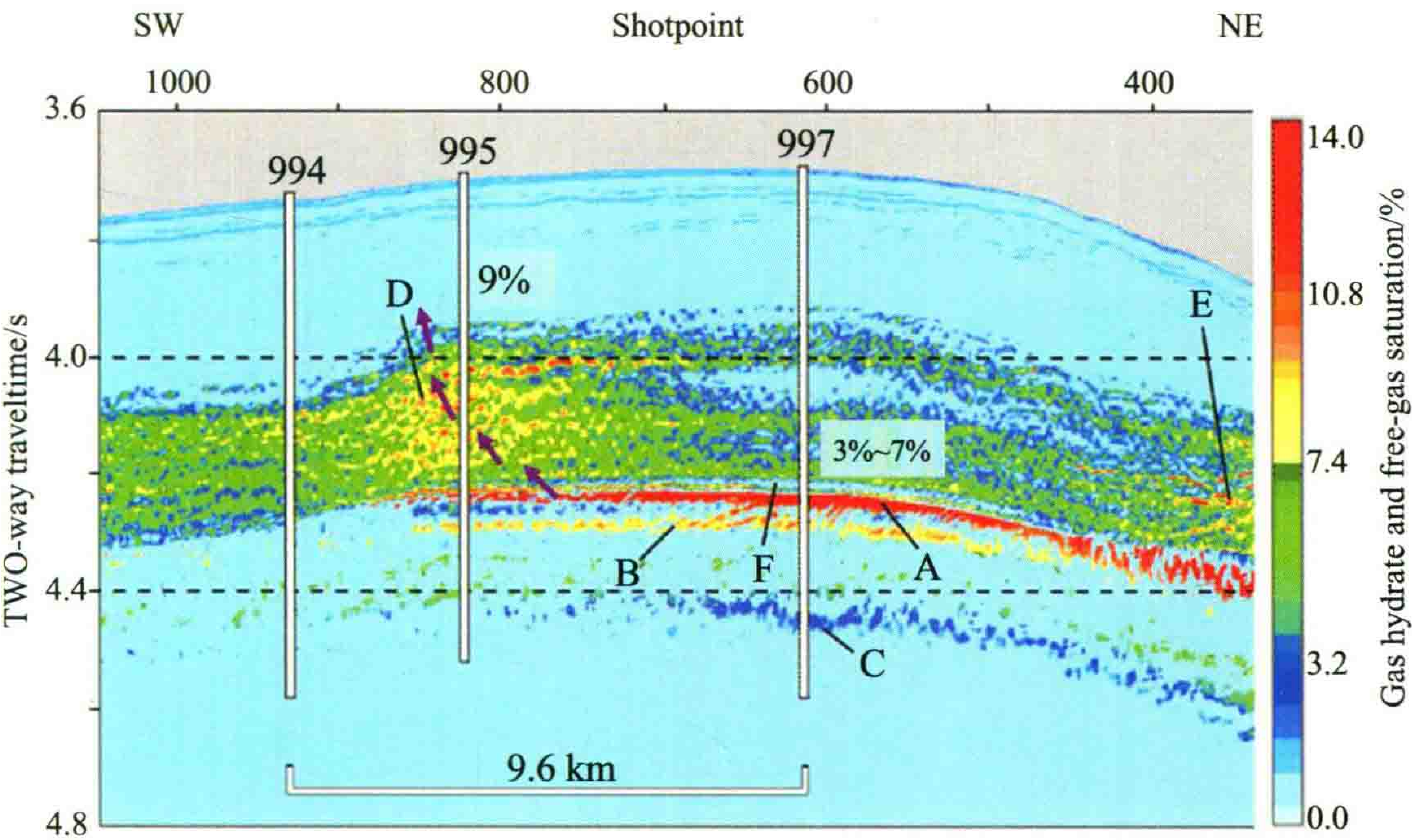


图 4 Blake Ridge 地区的水合物饱和度

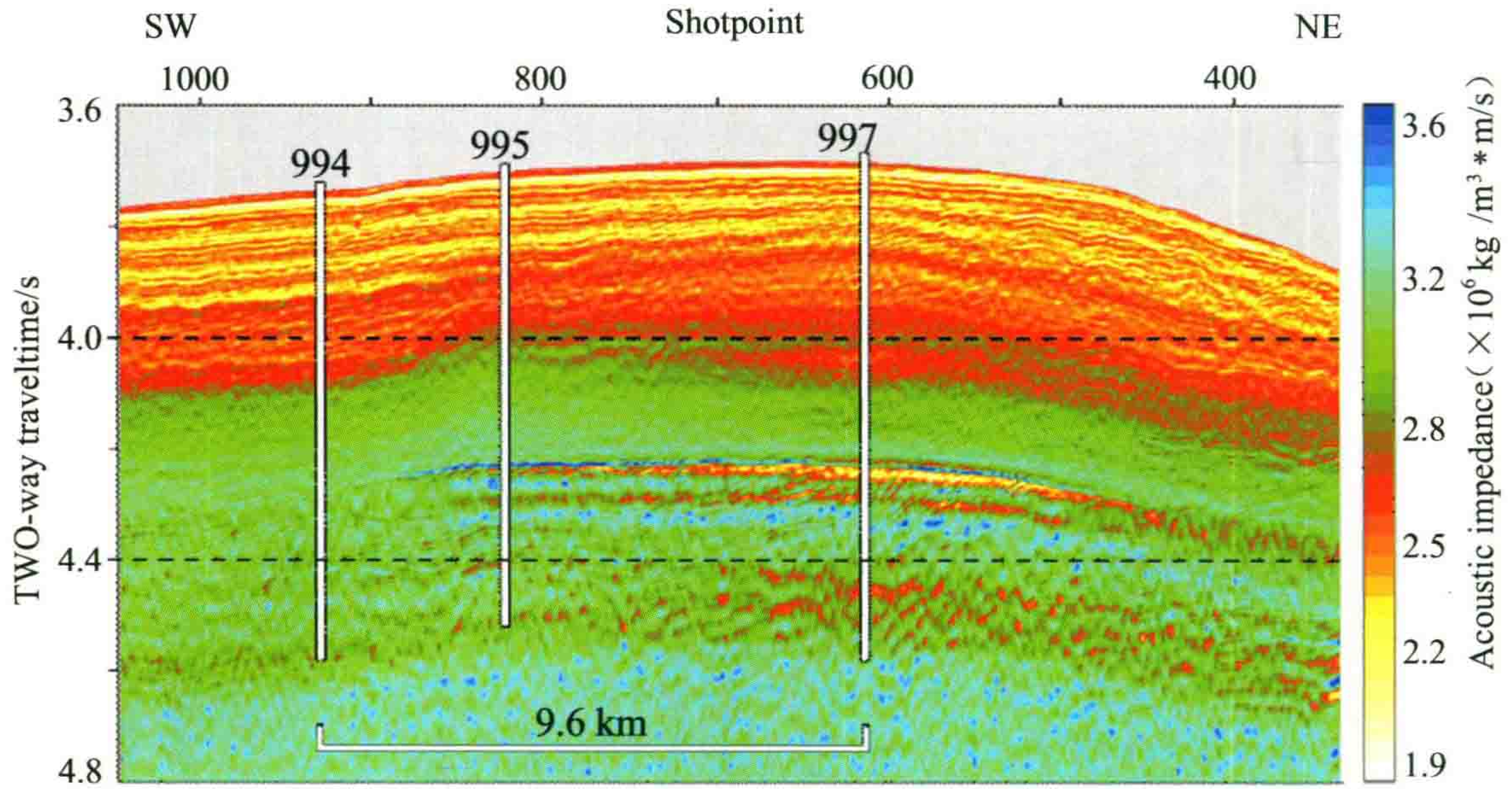


图 5 地震资料推算的声阻抗剖面

海底采集水合物时，有时刚好采到大块结晶的水合物，此时并不说明整个海底都是 100％的水合物。

(3) 东海的 BSR 做波阻抗反演后，发现游离态的气(Free Gas)，如图 6 所示。它赋存于一个斜坡上的薄层中，这是不能持久的，它必然是正在流动、而且正在补充着的天然气。

一般的气-水界面应该是平点，即使有泥岩隔层，也应该是平点(二连阿尔善油田，莺歌海东方 11-1 气田)，如图 7 所示。

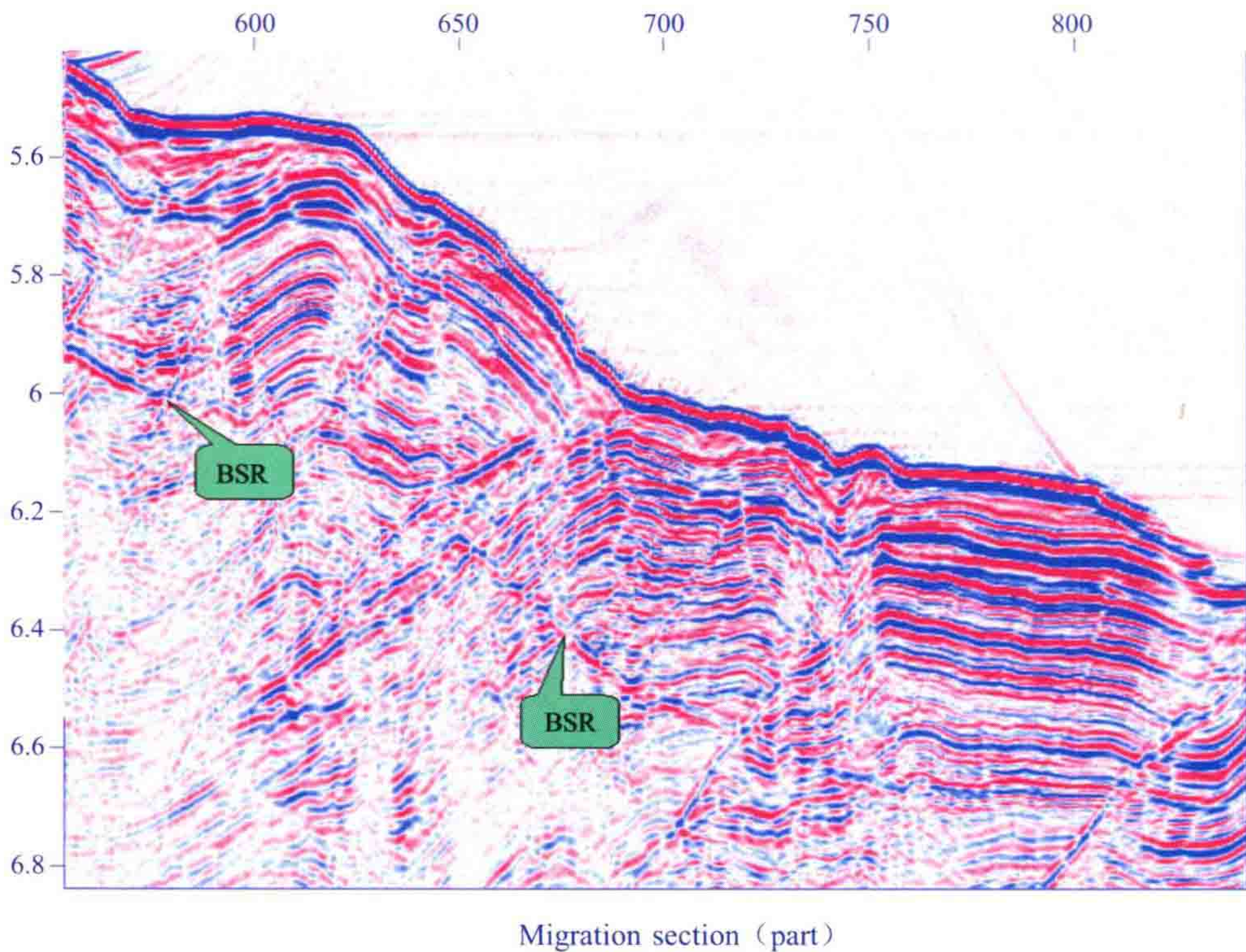


图 6 地震偏移剖面上显示我国东海存在天然气水合物

(据青岛海地所资料，吴志强)

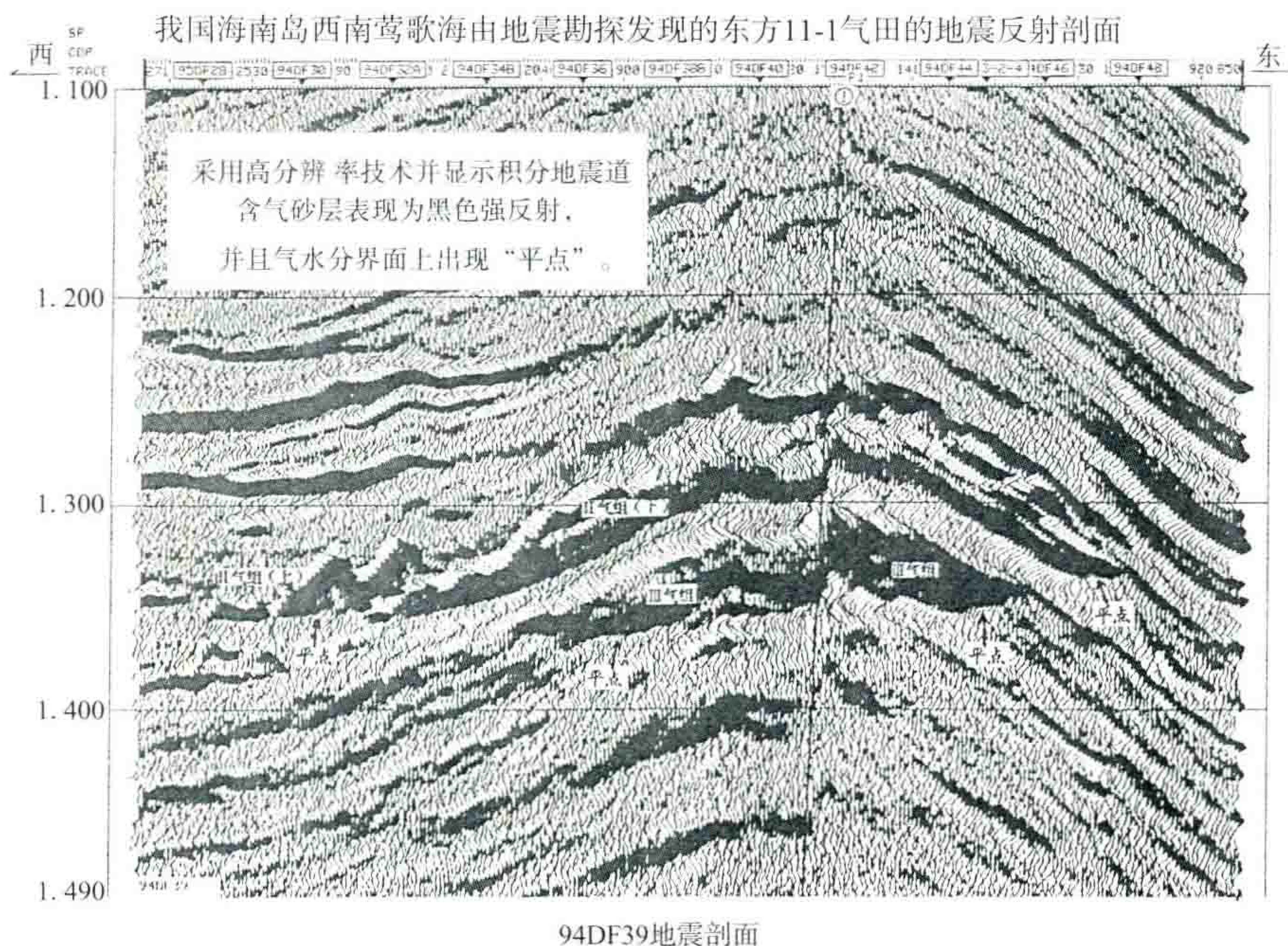


图 7　我国海南岛莺歌海地区 94DF39 高分辨率积分地震道地震剖面

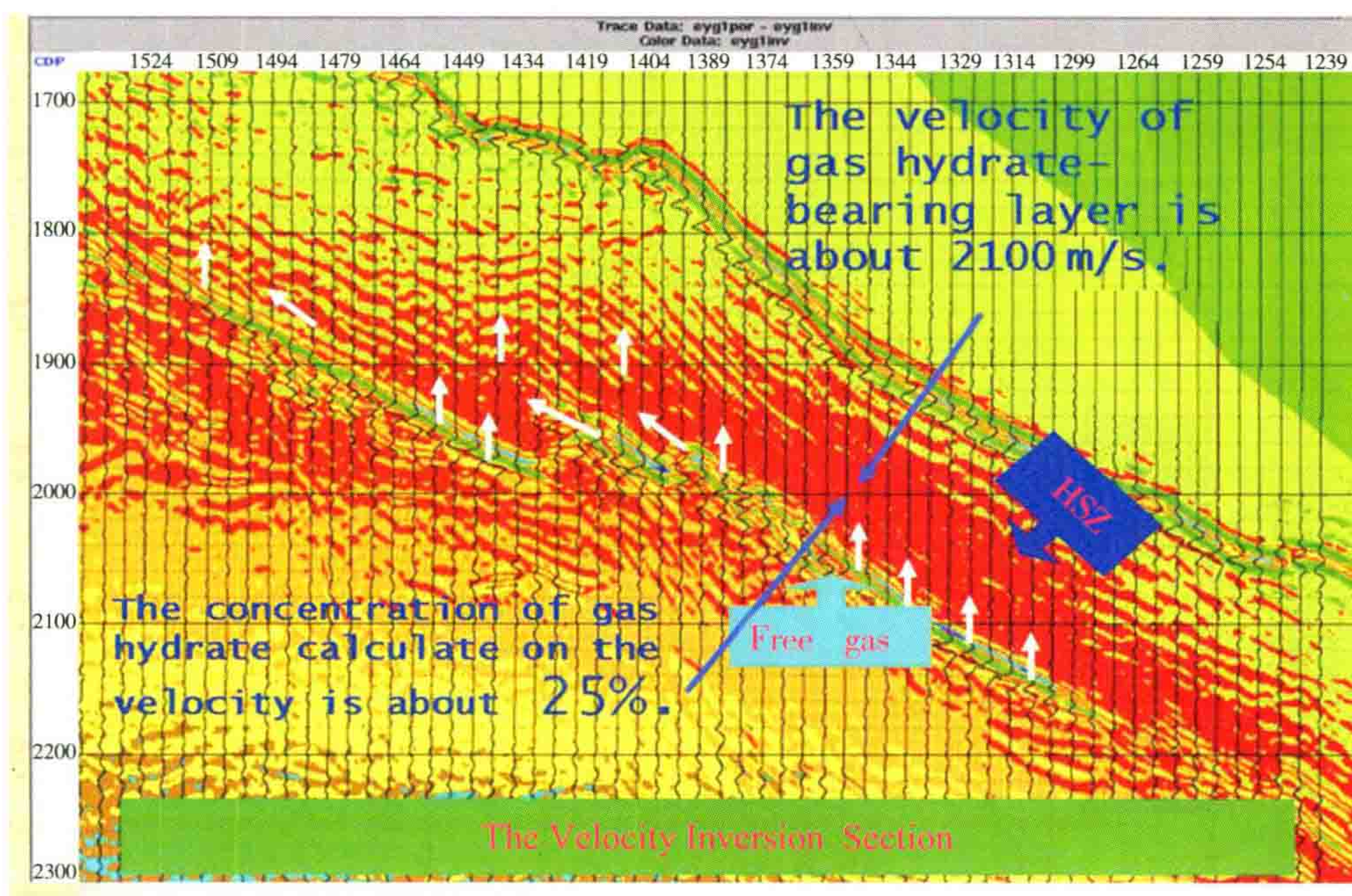


图 8　在地震资料波阻抗速度反演剖面上的水合物分布区

（据青岛海地所资料，吴志强）

如图 7 所示，通过地震资料波阻抗速度反演技术，可以清楚地显示固态的水合物分布区（红色），及游离气存在的位置（红色下面的绿色条带）。**请注意，游离气层的产状是倾斜的，这是不可能稳定的，它说明游离气正在向上逸散。而且从海底到游离气之间的部分是水合物的分布区，从波阻抗值可以看到整个水合物区里，剖面颜色从下方深红色逐渐向上变为淡绿色，再到深绿色，说明水合物的浓度由下到上的逐步降低。这与美国 Black Ridge 的情况是一样的。**

如图 7 所示，在我国南海西部石油公司所获得的高分辨率地震勘探剖面（积分地震道）有着极好的地

质效果。在该地震剖面上，常规的天然气藏其气-水界面为严格的水平面，称反射“平点”。这才是比较稳定的含天然气层的状态。

造成稳定水合物中甲烷不断分解及向上迁徙的机制如下。

(1) 温度的上升，深海海流的改变造成洋底温度改变。

(2) 压力的下降(主要是大规模的海平面下降，包括每天的潮起潮落)。

(3) 孔隙里水中的溶解态甲烷只要稍微减少到饱和溶解度之下，即使温压条件都符合水合物稳定条件，由于浓度差异，水合物也会自动分解。

(4) 甲烷以分子状态向上方持续的扩散作用。

(5) 断层、裂隙等自由通道造成甲烷的容易逸出。

(6) 构造活动(包括地震及滑坡)。

如图 9 曲线所示表明：自然界中天然气水合物产出受温度、压力和水合物的组成等控制。

下面的内容摘自《国内外天然气水合物成矿成藏数值模拟技术研究现状及发展趋势调研报告》的子课题《仿深海高压低温地质条件天然气水合物成矿成藏数值模拟技术调研》一文，**该文由王家生、甘华阳[中国地质大学(武汉)]和陈建文、龚建明(青岛海洋地质研究所)发表。**

Dickens 和 Quinby-Hunt(1994)第一次提出一个海水中甲烷水合物稳定带 P-T 数值的测量值，它们拟合成一条线性方程，其数据如下：

$$\frac{1}{T}=3.79\times10^{-3}-2.83\times10^{-4}\log_{10}P \tag{1}$$

温度 T 的单位为 K，压力 P 的单位为 MPa。

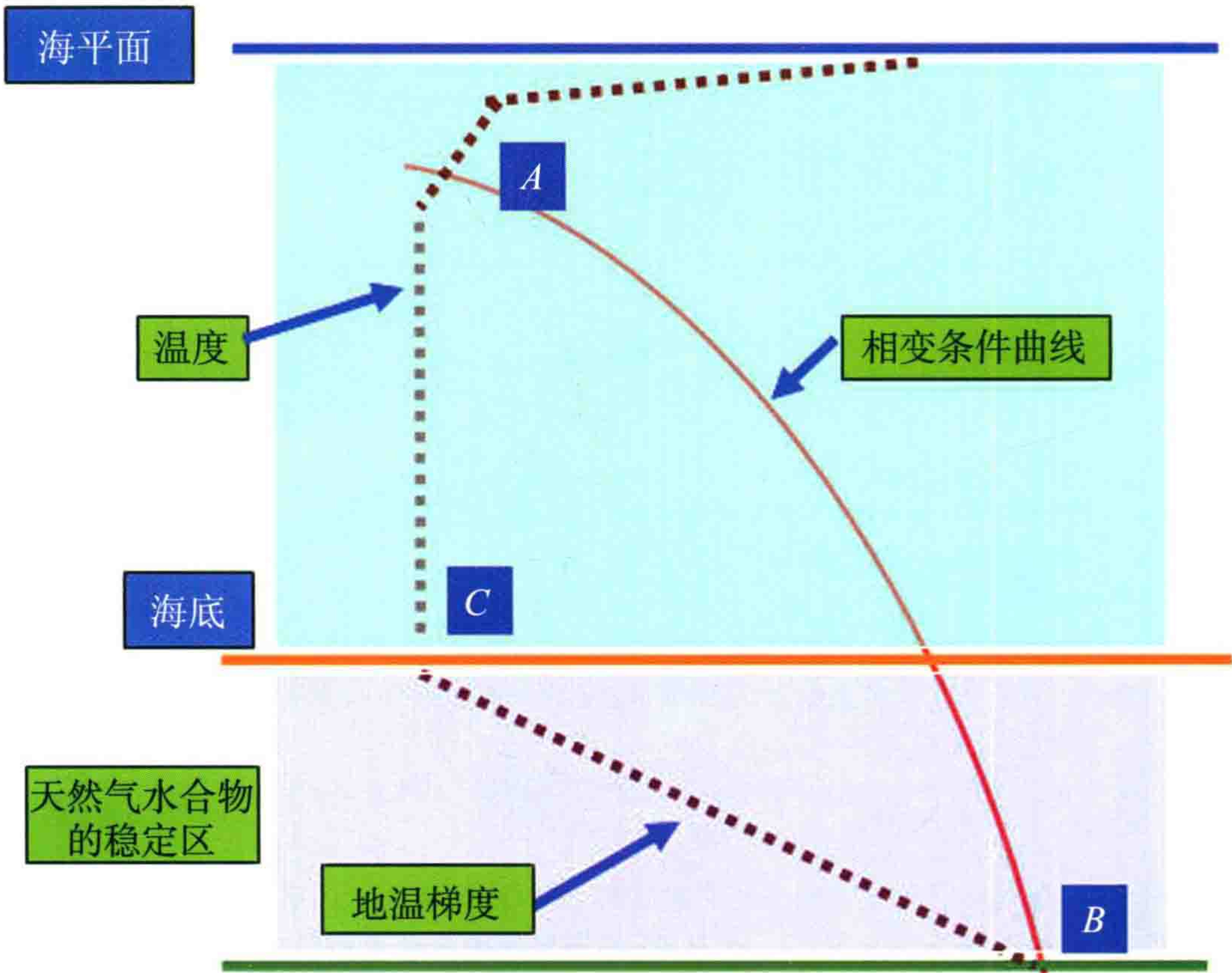


图 9 自然界中天然气水合物能稳定存在的温度-压力条件示意图

依据克拉伯龙方程如下：

$$\frac{d(\ln P)}{d\left(\frac{1}{T}\right)}=-\Delta H/ZR \qquad (2)$$

这儿 ΔH 是形成焓，Z 是压缩度，R 是气体常数。

Sloan(1990,1998)指出，这个方程在有限的温度范围内（假定 ΔH 和 Z 是常数）预测出了一条直线。进而拟合成一个简单二次多项式：

$$\frac{1}{T}=3.83\times10^{-3}-4.09\times10^{-4}\log_{10}P+8.64\times10^{-5}(\log_{10}{}^{2}P) \qquad (3)$$

这些方程外推到更高的 P-T 条件揭示出更大的差异。

当把压力转换成深度后，因此也就引入了由于重力和纬度造成的误差，Brown 等(1996)将上述数据拟合成不同的二次多项式，得到：

$$T=11.726+20.5\log_{10}z-2.2\log_{10}{}^{2}z \qquad (4)$$

这里的 T 是摄氏温度(℃)；z 是深度(km)。这个方程将深度转换成压力。

用更高温度和压力下的海水甲烷水合物稳定数据，就可以知道这个方程是正确的。

Dickens 和 Quinby-Hunt (1994,1997) 已预测出，在相同压力下纯水中和海水中的甲烷水合物预测结果之间存在 1.1℃～1.2℃的误差。

Handa(1990)对纯水中甲烷水合物稳定性数据在 0.2～40 Mpa 压力下作了拟合，得到如下表达式：

$$\ln\left(\frac{P}{P_0}\right)=-1205.907+\frac{44097.00}{\mathrm{T}}+186.7594\ln T \qquad (5)$$

这里 T 是温度(K)，$P_0=0.101325$ Mpa。

应用平均离差计算上述方程的纯水甲烷水合物稳定性，就能检测高温下的三个预测值。

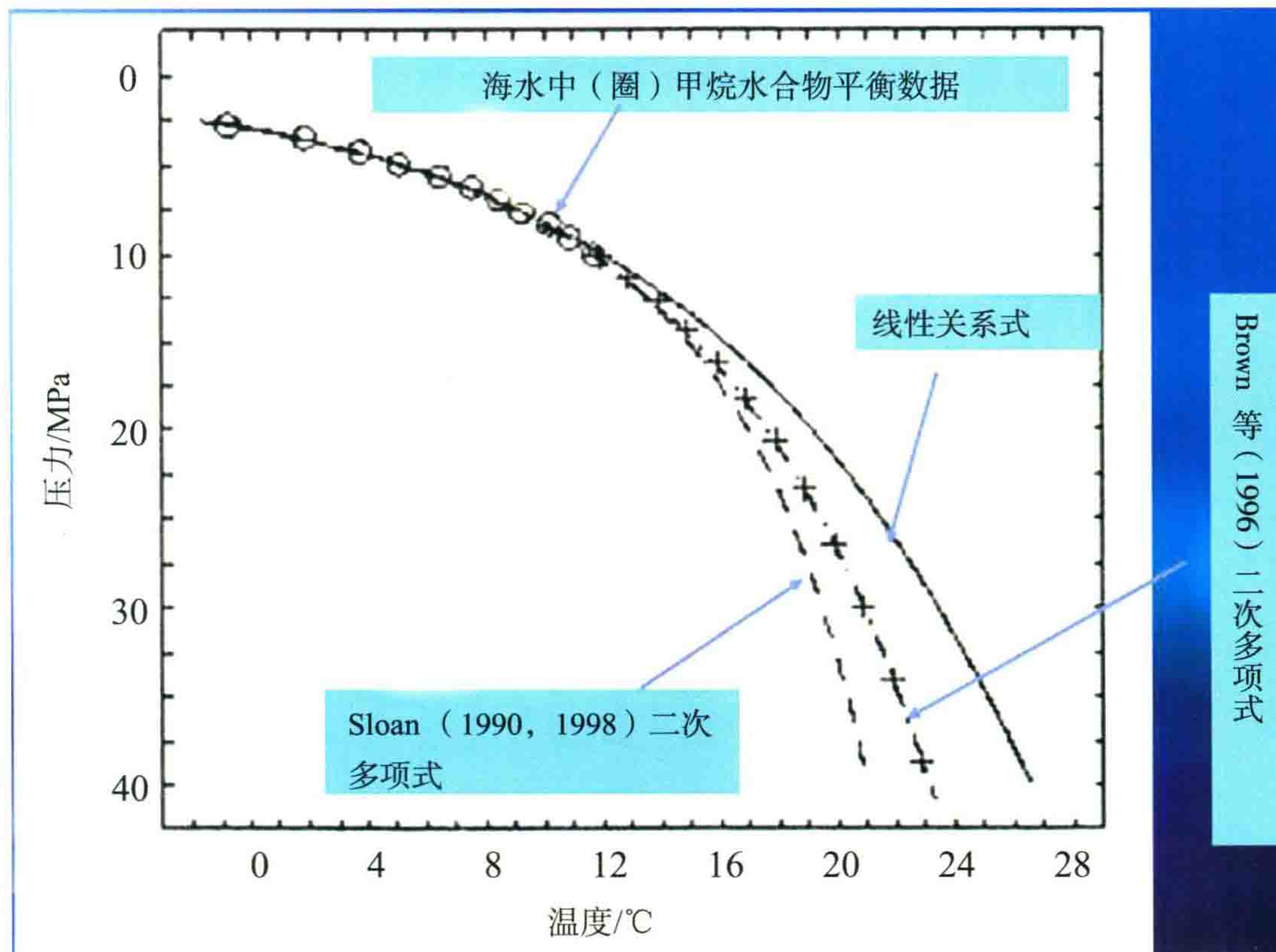


图 10　海水中(水圈)甲烷水合物平衡数据的曲线比较

——王家生、甘华阳、陈建文、龚建明

图 10 就是海上水合物的相变平衡曲线及两种公式计算的比较。

线性关系投点[方程(1),实线],二次多项式[方程(3),虚线],转换成绝对压力后的方程(4)(点虚线)。Dickens & Quinby-Hunt (1994) 海水中(圈)甲烷水合物平衡数据和方程(9)间隔 1℃所计算获得的淡水稳定数据,与调整成海盐分解效应之间相差 1.15℃(+)。

值得注意的是,水合物稳定带里的甲烷与空隙水中的甲烷浓度之间存在着密切的关系。

当孔隙水中的游离甲烷浓度低于水合物的溶解度时,即使在恰当的热压条件下,水合物也会分解,释放出甲烷呈溶解态,被水流迁移到水圈。因此,水下甲烷的水合物状态只是其在地球历史中的一个瞬间。

Ginsburg 等(1997)分析了海底水合物稳定带中甲烷的迁移与化学势关系。甲烷上升气流的扩散似乎是受某一深度的气态甲烷的化学势与溶解甲烷的化学势的差异控制的。此差异源自近似于流体静压力的游离态甲烷的压力与溶解的甲烷的蒸气压力之间的差异。后者换言之,孔隙水的饱和程度应该与天然气水合物形成的平衡压力相近(图 11)。

水合物聚集另外需要一个重要条件,即气体的供应,而这在无直接流体迁移情况下是不可能的。因此可以立即得到一个结论,流体的迁移是天然气水合物地质学的一个关键问题。

更令人信服的证据是与水合物相关的海底喷气作用和孔隙水成分的异常,它被解释成是外来流体加入引起的。

并不是所有的含水合物的沉积物特征都归因于流体的渗透,但与水合物相关的喷气作用显然与其有关。扩散作用也起一定角色(Ginsberg 等,1993)。

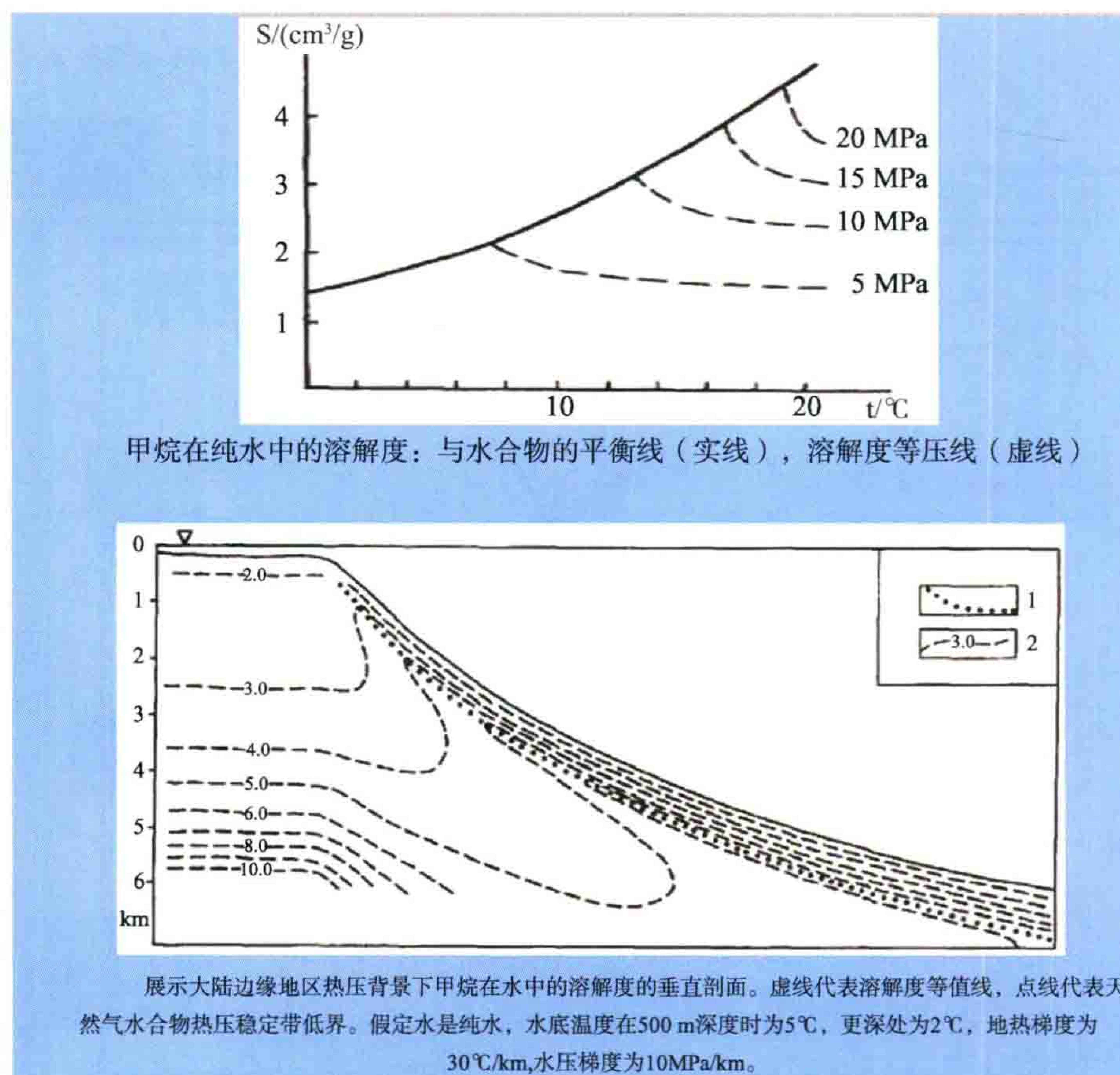


图 11 甲烷在纯水中的溶解度

二、对水合物不断分解、甲烷不断逃逸的经常性机制的认识

关于水合物不断分解、甲烷不断逃逸的经常性机制，我有如下认识。

（1）由于海流的流动，海底水中甲烷的溶解度一般地说不会达到饱和溶解度，这就像结晶盐放在不饱和的盐水中就会溶解一样（图 12）。

于是，稳定水合物顶界面，点 C 处的水合物会自动分解，以补充增加水中甲烷的溶解度，这个机制决定了稳定水合物顶界面甲烷的不断向上迁徙。

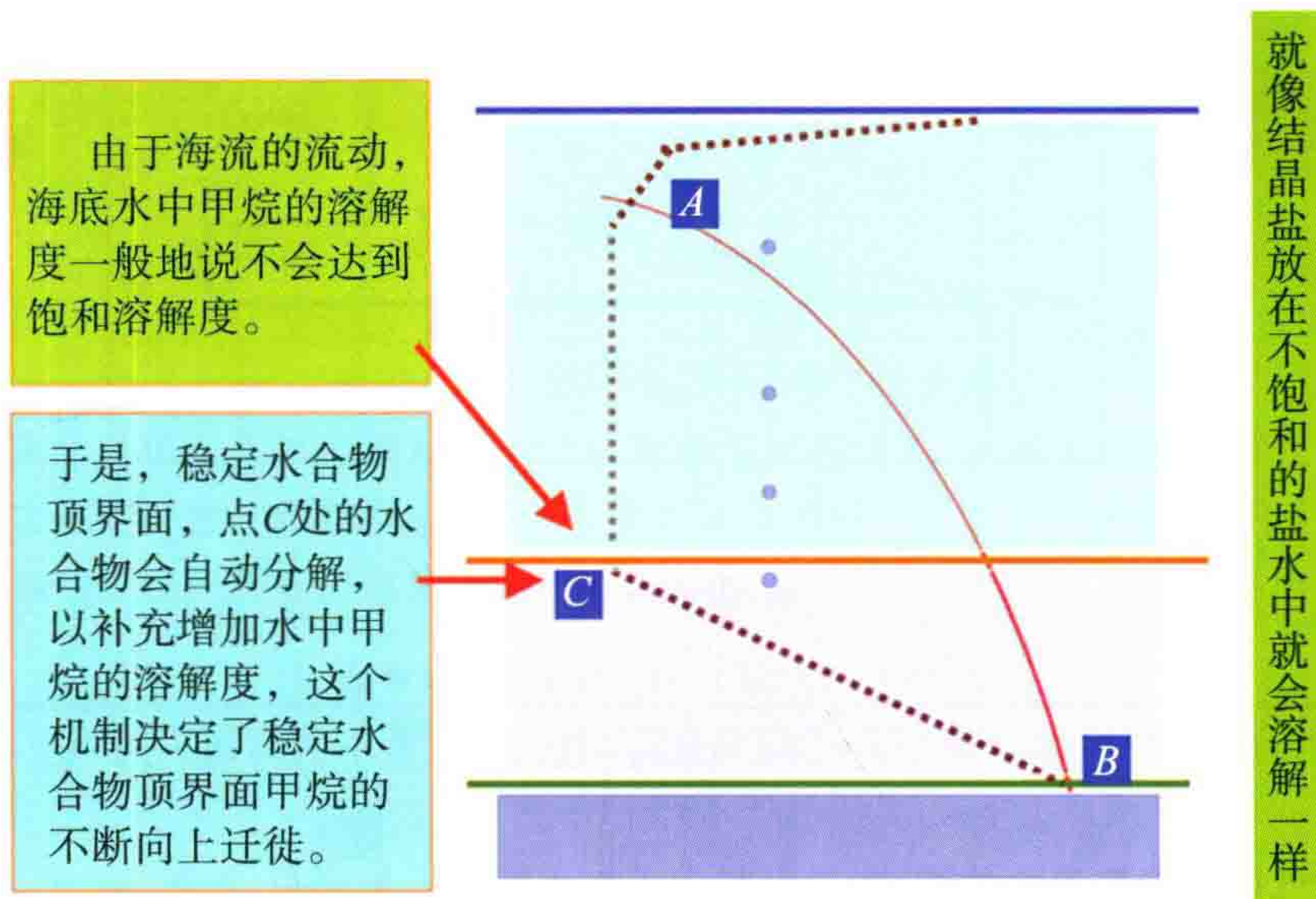


图 12　对水合物不断分解、甲烷不断逃逸的经常性机制的认识(1)

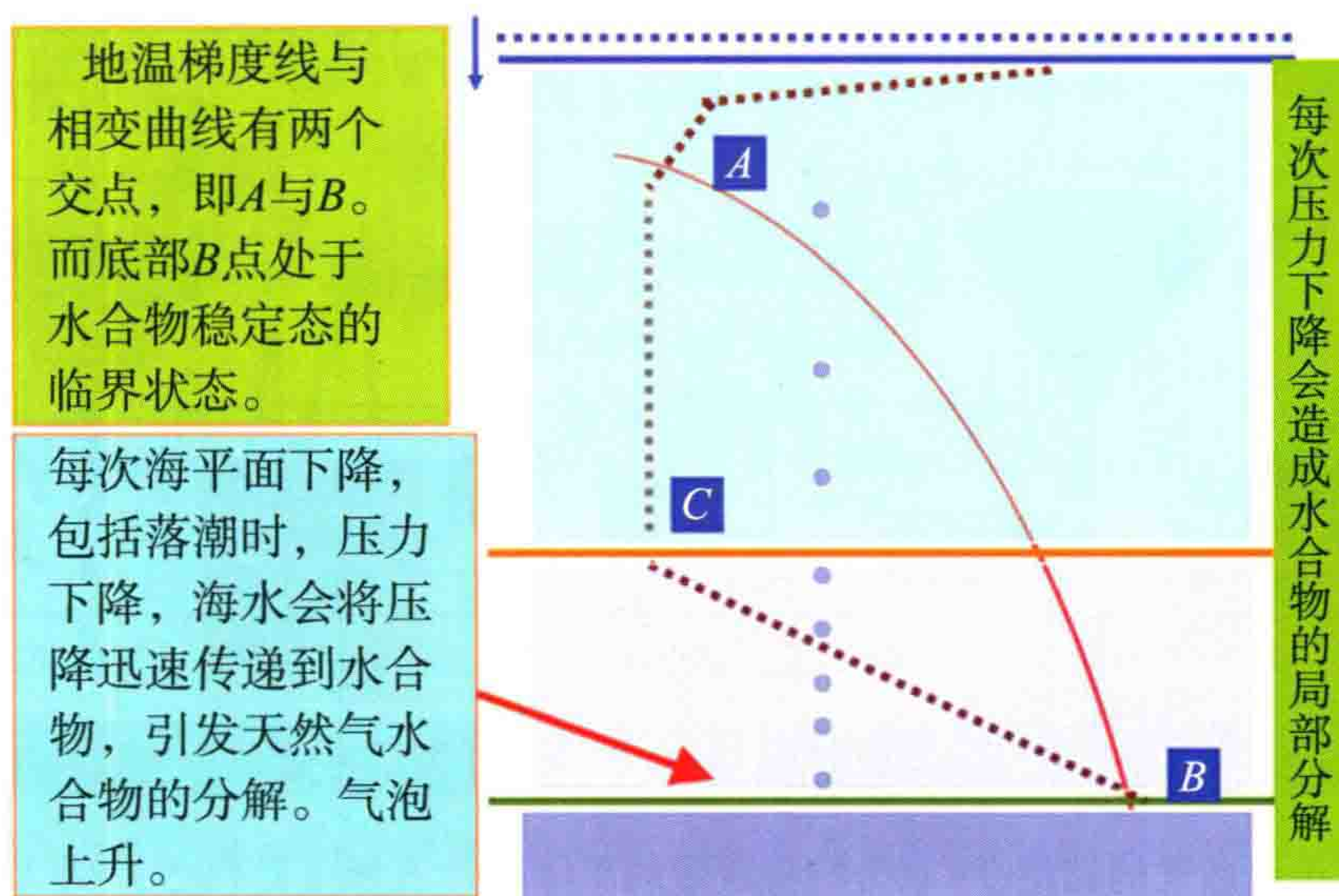


图 13　对水合物不断分解、甲烷不断逃逸的经常性机制的认识(2)

（2）地温梯度线与相变曲线有两个交点，即 A 与 B，而底部 B 点处于水合物稳定态的临界状态（图 13）。每次压力下降会造成水合物的局部分解。

每次海平面下降，包括落潮时，压力下降，海水会将压降迅速传递到水合物，引发天然气水合物的分解，气泡上升。

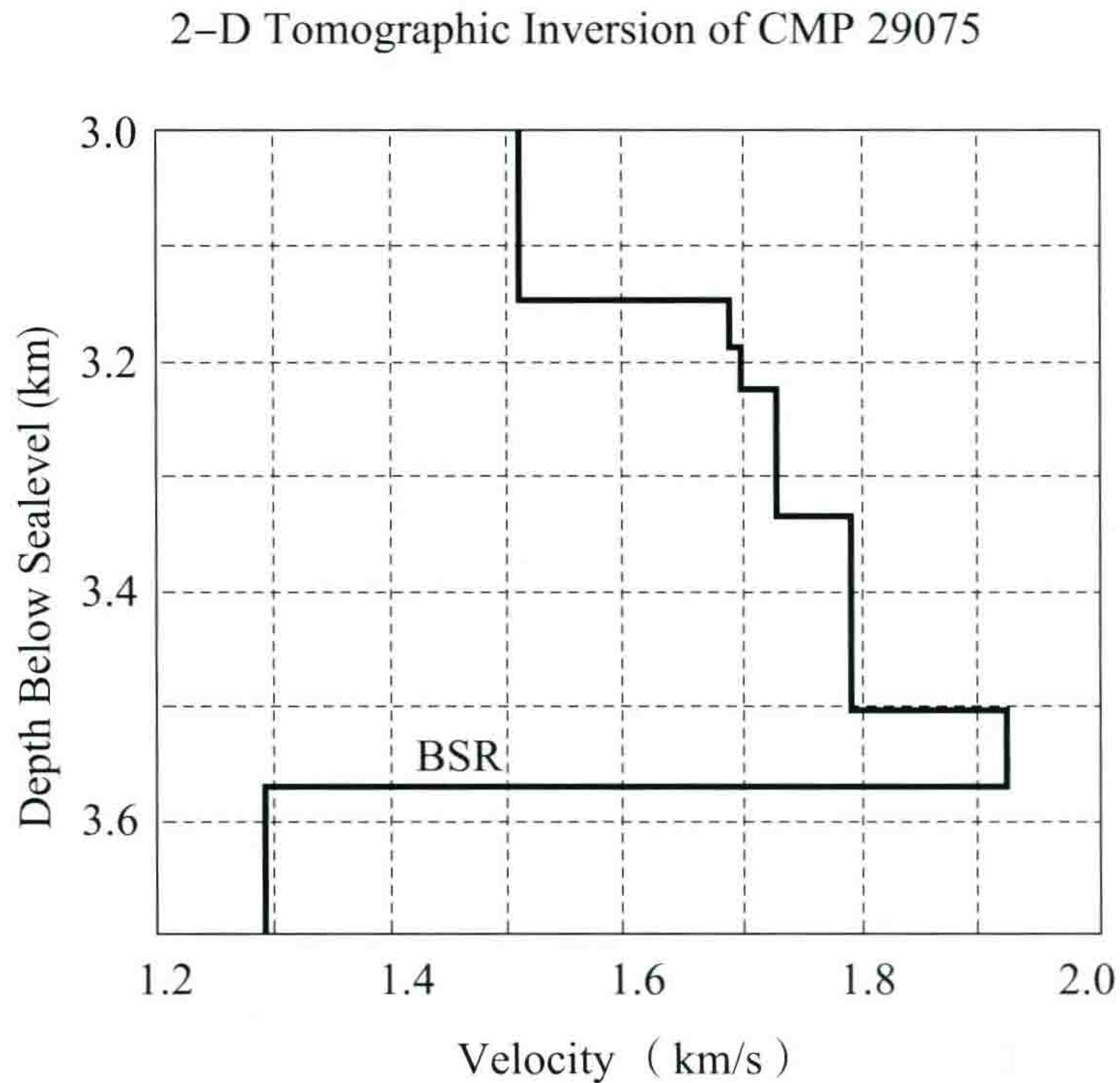


图 14 CMP29075 的二维层析反演结果

图 14 能够说明为什么海底水合物的浓度是下面大，向上愈来愈小的问题。因为上面的地层中甲烷容易逃逸。

关于水合物的气体充注与漏失关系，我采用漏斗里加水的例子来说明，如图 15，**上下颠倒来看**。

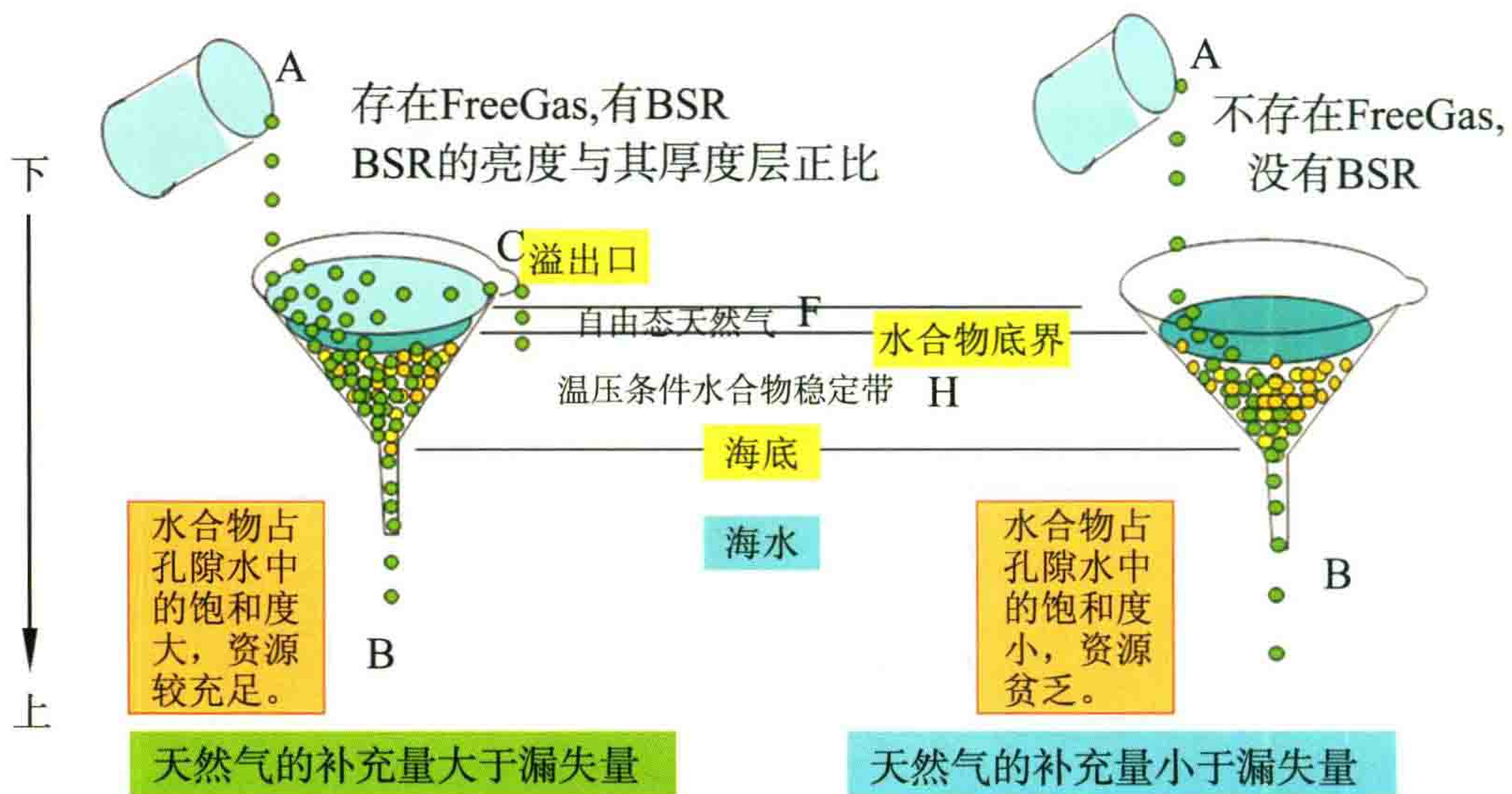


图 15 水合物的气体充注与漏失关系

我的几点分析如下。

① 地震发现有 BSR(似海底反射)的地方说明存在自由态的天然气，BSR 的亮度与其厚度层正比。这是判断水合物是否丰富的一个标志。

② 地震没有 BSR 的地方一般是极贫矿。

③ 根据地震反射波阻抗的标定，可以粗略地推算孔隙水中含有水合物的饱和度。

④ 根据饱和度剖面可以大致判断天然气的流动方向。也就是饱和度偏大的路径，如图 4。

⑤ 把井打到 BSR 最亮点处，可能是开采天然气最合适的地点。水合物漏失的喷口处也可能是搜集天然气的合适地点。

(3) 此外，潮高(海平面)每月每年还有涨落周期(图 16)。深海海流的改变、厄尔尼诺现象、洋底温度改变等，也能造成大周期的散失。大周期的压力及温度涨落更有利于地层中水合物甲烷方便地逃逸。在过去地质历史中，每次盛冰期，海平面下降，也会造成更大规模的水合物分解，释放甲烷气。

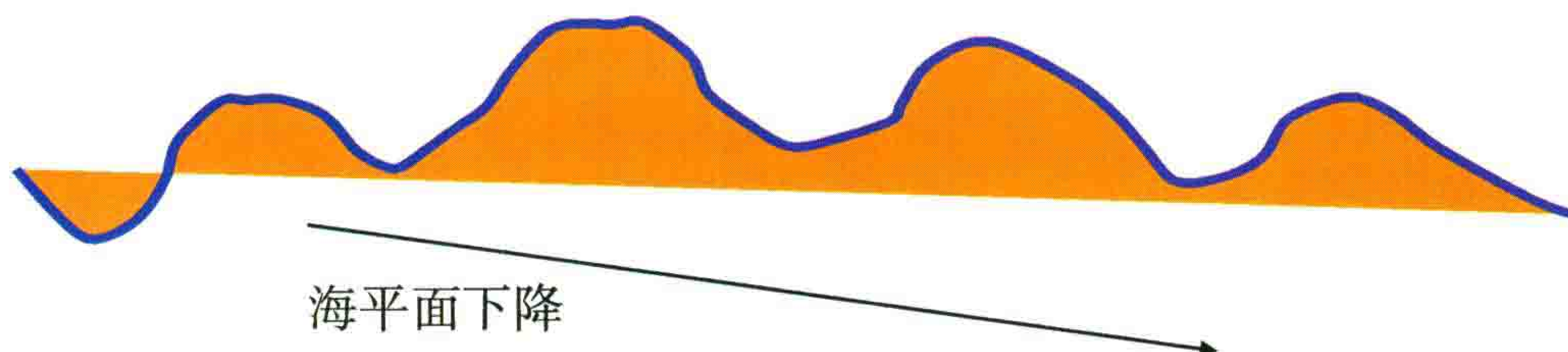


图 16　海平面下降过程及周期性的涨落

(4) 卫星红外照片发现在与水合物相应的地区常存在增温现象，大地震后水合物大量释放甲烷气。

(5) 据汪集旸院士资料古气候研究发现(南极冰柱样本测定)，过去 400 a 中，空气中的 CO_2、CH_4 与古气温三条线平行一致(图 17)，最可能说明历史上水合物大量向大气中释放甲烷。似乎 100 a 左右有一个大周期。

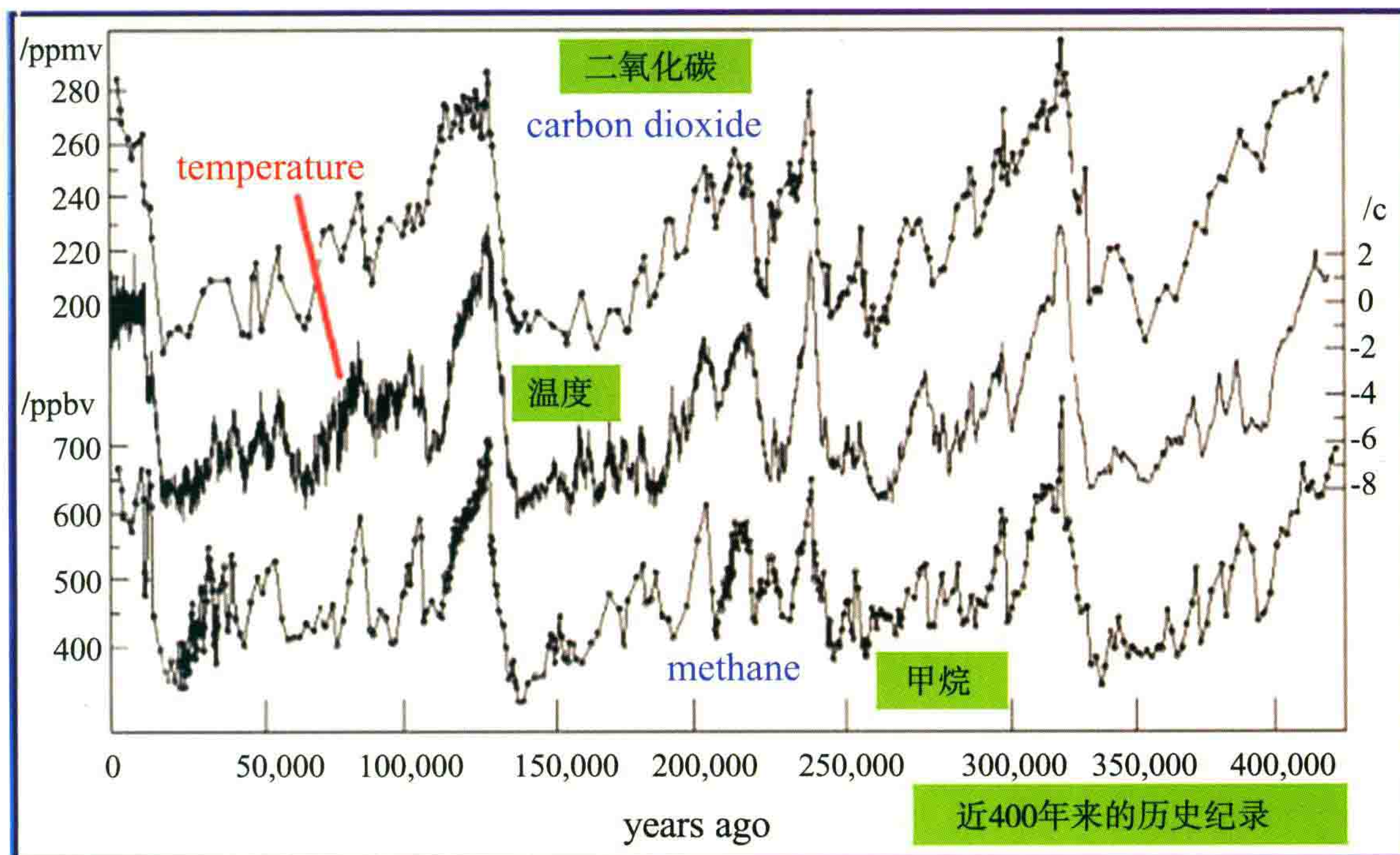


图 17　近 400 年来温度与空气中二氧化碳、甲烷含量变化的历史记录

从图 17 可看出，气候变化记录难道与水合物的分解影响有关？[据汪集旸院士资料(*Ice-core data from Vostok*, Antarctica)]。

众所周知，有一种解释，魔鬼死亡三角(马尾藻海百慕大三角)是水合物释放甲烷所造成的灾难，它造成水体密度降低，浮力减小，导致沉船。可见有些海域水合物甲烷漏失规模还是很大的。

三、初步结论

(1) 水合物矿藏处于“不断散失与不断补充地流动着的动态平衡之中”。

(2) 大多数情况下,漏失量接近等于补充量。如果补充量大于漏失量,则促使漏失加快及水合物饱和度增加。如果相变底界面以下闭合体积充分,便造成游离烃的积聚,Free Gas 厚度增加,BSR 明显。

(3) 游离态甲烷的最大厚度决定于稳定带底界面的立体形态,如果它平行于海底地形,则可以理论上做出其构造图。在其产状陡峭处,游离态甲烷不可能“悬挂”在那里,于是 Free Gas 厚度小,薄到 1~2 m 时,BSR 就不明显。所以有水合物的地方不一定有明显的、强的 BSR。

初步结论导出的推论如下。

(1) 甲烷气体的逸散必然与地层的气相渗透率有关,粗砂地层往往起到气体运移良好的通道,即能起到所谓“输导层”作用。相反,泥质岩由于颗粒细、孔隙小、表面张力大,存在“束缚水”,气相渗透性差,往往起到局部阻挡层的作用。

(2) 平面上,强 BSR 与海底漏失喷口的位置不一定相符合。漏失喷口的位置除了岩性较粗之外,还可能与断层的位置有关。

(3) 第四系砂泥岩组合的不同、产状不同,以及它与水合物稳定底界面的几何图形的搭配决定了水合物矿藏的形态,及其漏失方向、海底喷口的位置等等。

(4) 用合成孔径声波(SAS)及多功能声波多普勒水流测量仪(ADCP)寻找漏失喷口有着重要的意义(漏失道路上,周围的水合物浓度偏大)。如果海底地形为背斜隆起型,一般漏失喷口出现在隆起顶部,在那里(顶部)便容易取到水合物岩芯。相反,在翼部及低凹处,那里是甲烷气缓慢泄放区,水合物浓度小,则不易取到漂亮的岩芯。

(5) 在泥质的海底也不容易取到漂亮的岩芯,那里水合物可能以分散细晶出现,厚的泥质地层上覆盖的薄砂层中也不好。

(6) 关于水合物成因,水合物的储量估计为现有各种化石燃料的两倍(尽管此数据很值得怀疑),它们从哪里来的? 我想它是来源于上地幔。

对于常规油气田的成因,我曾经指出:现代生油理论存在着较大问题,我们应该把油气田看作在不断漏失及不断补充的动态平衡之中,历史上油气的漏失量远大于我们地质家宣布的各盆地的生油量。

对水合物的成因及其动态特性,我想恐怕更应该作如此设想(见我关于生油问题的文章《打破思想禁锢,重新审视生油理论》,《新疆石油地质》2003 年第 24 卷第 1 期)。

墨西哥湾深海的油气田与水合物呈“共生”的现象,可能说明油气生成的新的途径(图 18)。

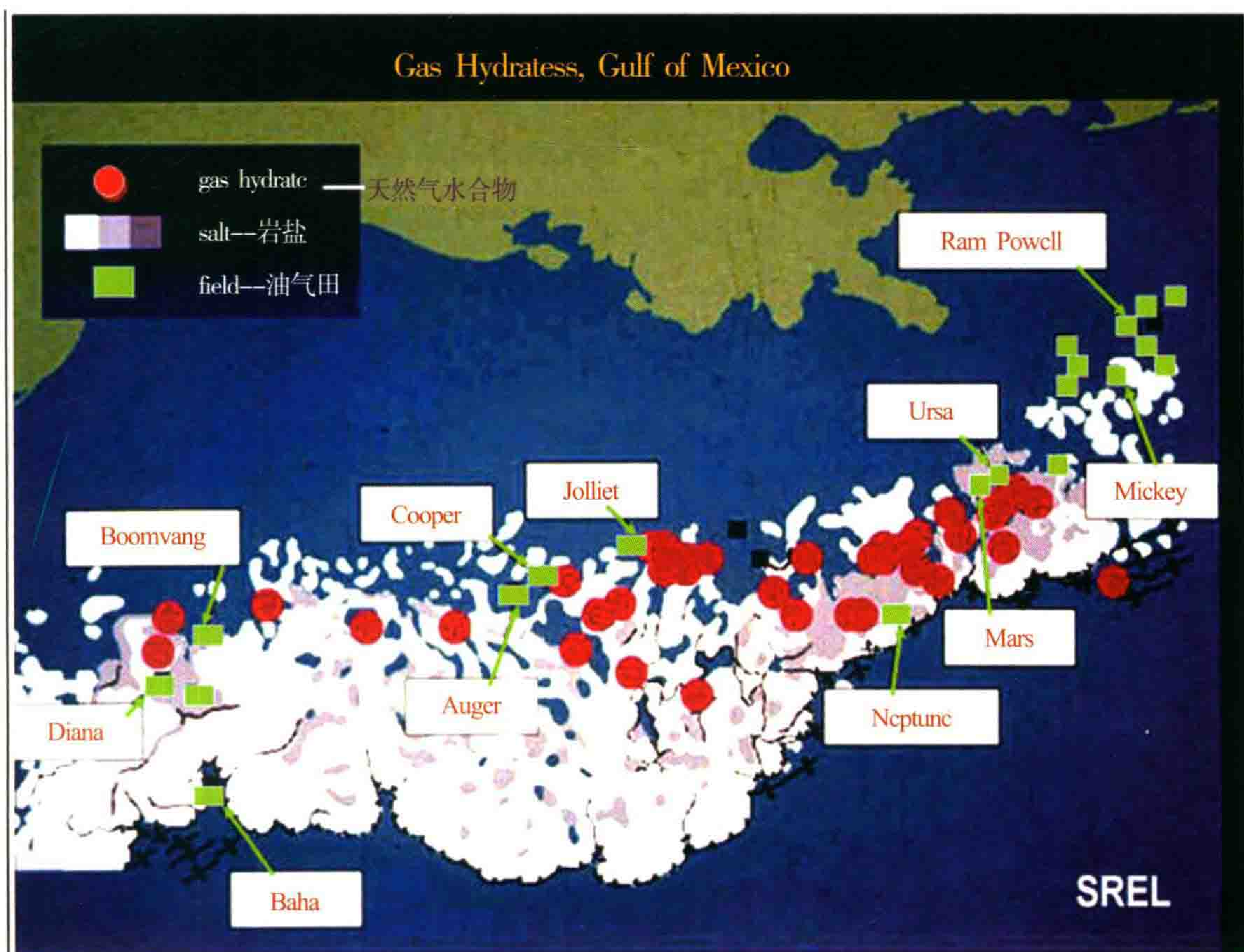


图 18 墨西哥湾天然气水合物与油气田分布情况

［佐治亚大学张传伦(2004)］

四、建议

综上所述，这里提出以下几点建议。

(1) 在实验室中用内窥镜观察研究甲烷气体如何从非饱和水合物岩芯柱的下方逐渐向上部迁徙的过程，进一步分析水合物饱和度在水合物稳定体(Stable Zone)中的上下分布规律，以及泥岩隔层的局部封堵作用。

在实验室中也可作如下实验：在长时间稳定在临界条件的水合物上减压 2.265 kP，6 h 内观察有无气泡析出(砂层及泥层中)。

(2) 进一步搞清 Free Gas 与 BSR 的关系，研究 Free Gas 的流动泄漏方向及轨迹，找到主要泄漏口，将来可用作采集口。

(3) 实验室进行疏松砂岩、泥岩的气相渗透率，计算逸散漏失的“半衰期”。精确测定纵横波速度及密度参数与水合物的饱和度、孔隙度、泥质含量之间的关系十分重要。

(4) 采用合成孔径声波成像(SAS)及多功能声波多普勒水流测量仪(ADCP)的手段在海上寻找甲烷的释放口，并研究其释放规模，十分重要。最好采用长期观测，研究它与温度压力的变化关系。可能今后找到甲烷释放口也有着与取到水合物样品同样重要的意义，甚至今后水合物的开采也应该把甲烷释放口当作采气、集气口。

(5) 地震勘探要在四方面进行改进——不要满足于 BSR。

① 由于水合物埋藏在海底以下较浅的部位，完全可以提高分辨率，主频达到 300～500 Hz 是可能的。

以下为几个海上高分辨率勘探的实例，它们说明了海上资料可以达到高分辨率的可能性。

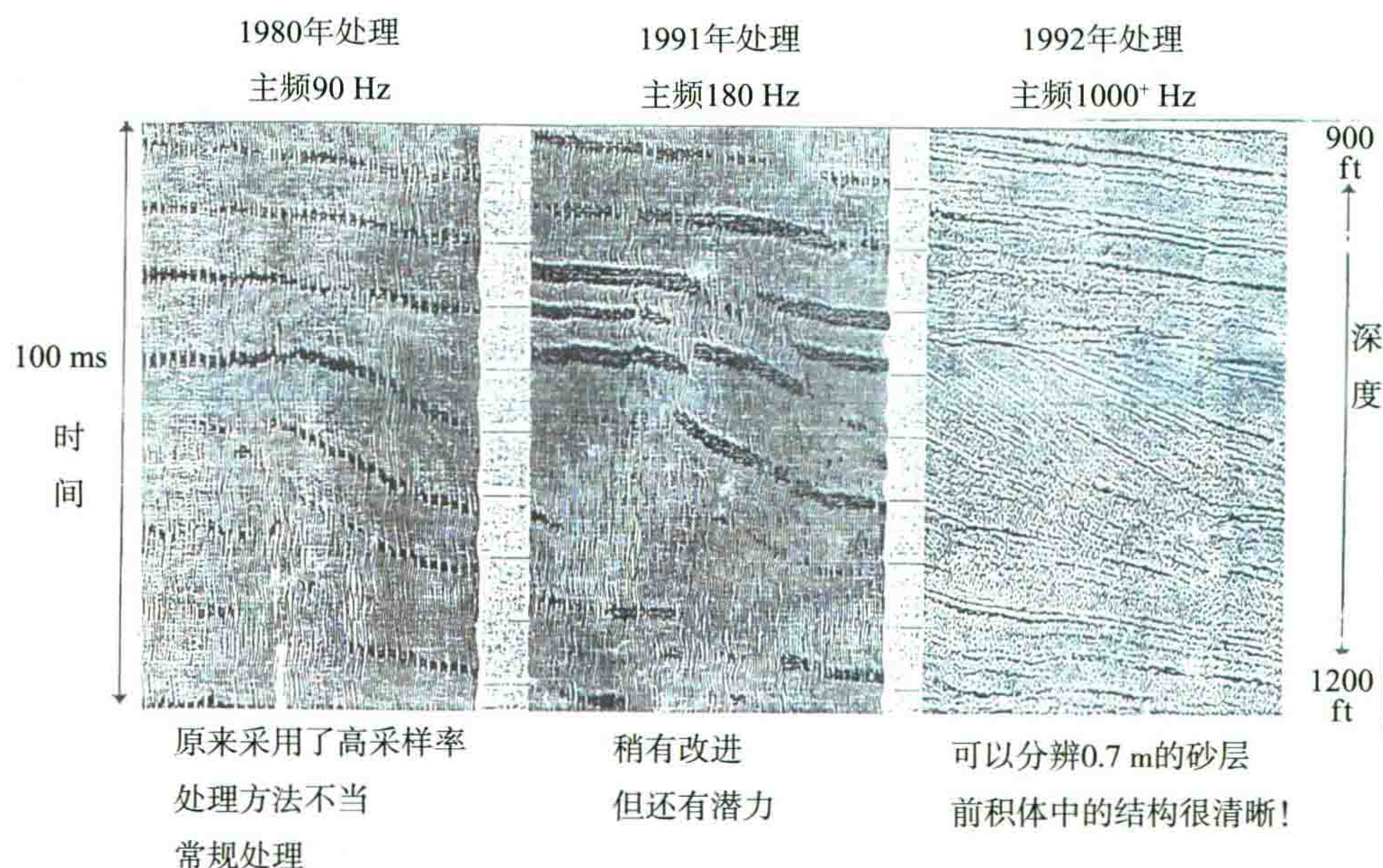


图 19 美国海上高分辨率勘探实例

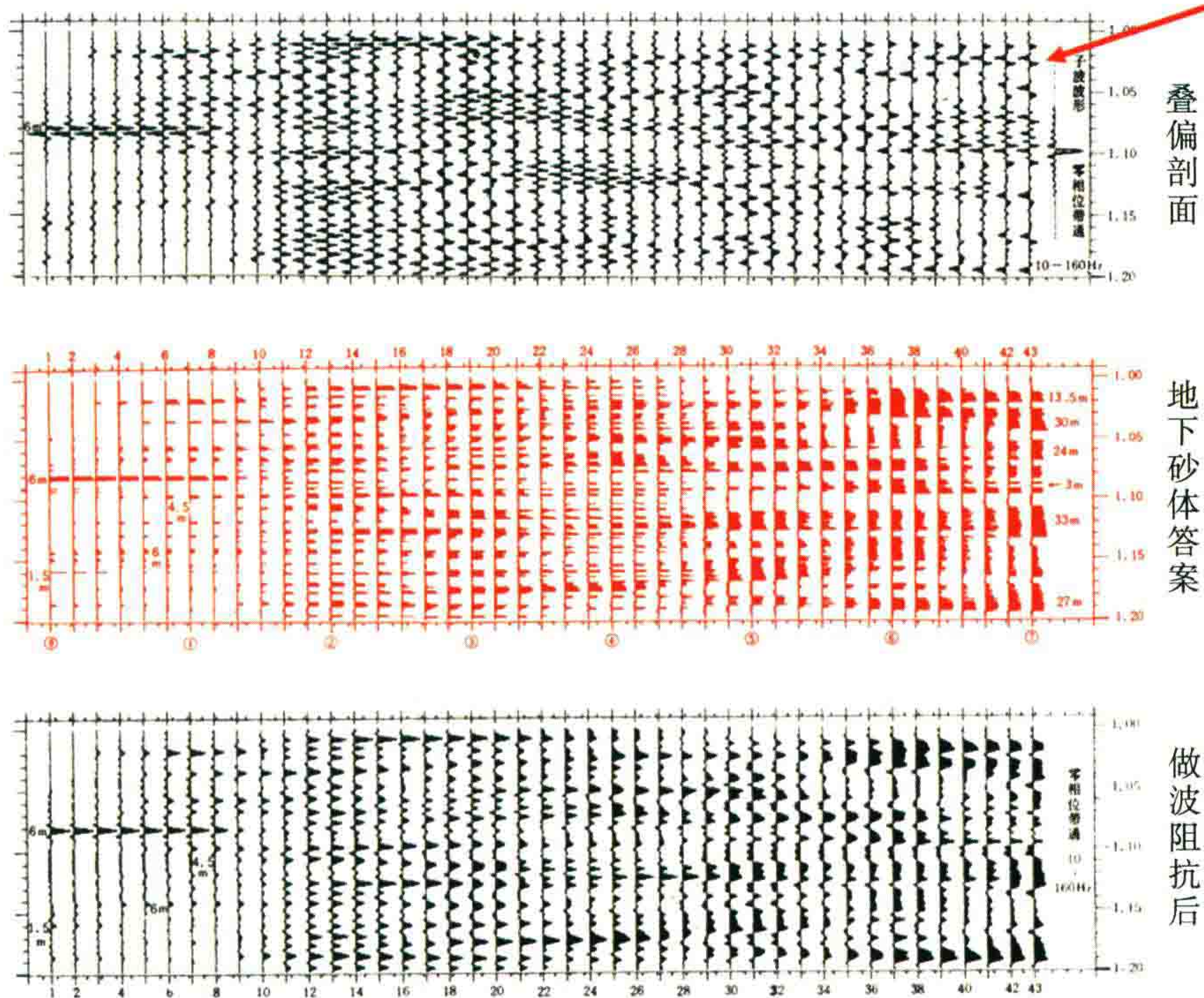
图 19 为美国在海上获得高分辨率地震剖面的例子，可以看到在深度为 900 至 1200 ft 的地方，主频可达 1000 Hz，可以分辨 0.7 m 的砂层，前积体中的结构很清晰。该实例海底就在图幅的上方，由于海水对地震波的吸收很小，因此容易获得分辨率很高的剖面。

美国 Parker 公司的海上浅层高分辨率剖面实例，在 0.9 s 处主频达到 340 Hz 以上(海水深 0.5 s)。

我国南海也有一个高精度三维地震的例子，这就是流花 11 油田的高分辨率勘探。野外采集的记录高频有效频率已达到 180 Hz(1.25 s 目的层)。经室内处理后，最高有效频率达到 240 Hz(主频约120 Hz)，可以分辨 4 m 左右的储集体(可识别的厚度约为 2 m)。

② 分辨率提高后，亮点及 Free Gas 可能将更不清楚，需要做波阻抗反演。

图 20 为砂体模型与其正演数据体的叠偏剖面及波阻抗剖面对比图，剖面主频在 90 Hz 左右，在实际中应该是很高的分辨率了，但在叠偏剖面上仍看不清砂体的分布，而波阻抗剖面就与砂体模型吻合的较好。



高分辨率的剖面，主频90 Hz左右的情况。

有了很高分辨率的剖面反而看不清地下的砂泥岩分布。

图 20　砂体模型的波阻抗剖面与普通叠偏剖面对比图

因此，可以说有了较高分辨率，不作波阻抗就好比是农夫辛辛苦苦种了庄稼，不去收获。有了高精度的三维地震资料便能处理成波阻抗三维数据体，就能分析那里有水合物那里有游离态气层，并可作三维的可视化分析。

③ 横波的反射率(速度反差)比纵波大，做弹性波阻抗反演更有利于划分岩性及判断水合物的分布。

④ 用AVO反演弹性波阻抗在方法上要改进，炮检距要加大，入射角要达到40°～50°，这要求改进野外施工。不一定要作三维，但是角道集剖面要高质量。

在墨西哥湾用AVO反演弹性波阻抗的有一个成功例子，该例子来自于英文文章，文章名称：*Identification of Shallow Water Flow Sands from 3D Seismic Data (Garden Banks, GOM)*（墨西哥湾Garden Bank深水区从三维地震数据中搞清浅层高压水砂层分布的实例）。

该文在导论中叙述道：“在深海钻井中，超压、未固结、未胶结砂岩中的浅层高压水流SWF常常造成钻井事故，是一个非常严重的问题，每年都要花费大量的金钱来防止和补救此类事故。”该文在结论中写道：“普通道集振幅看不出明显的异常，只有用弹性波阻抗反演才能比较好的找出高压水砂层的存在位置。”

(6) 关于水合物的开采，应对开采工艺有足够的重视。

对开采水合物的难度要有足够的认识，可能是一群鼾睡的狮子，有危险！需要小规模、安全性的试验。**不解决开采的实际问题，开发水合物只是画饼充饥。**

开采原则：安全第一，从小规模开始摸索。

将来水合物的开发具有很大的危险性，比较安全的方法如下。

① 在Free Gas区打井开采，可以用现成的技术，开采速度应该大致保持在甲烷的补给速度。游离态甲烷采出后，造成局部负压，压力的减少进一步引起上覆水合物的局部分解，这是比较经济的采法。

② 可以用多分支井，甚至“鱼骨状”分支井，后者正在我国开发煤层气中发挥重要作用(参考图21～图26钻井技术及井下作业技术)。

③ 在水合物体的顶部开采甲烷，最好把甲烷释放口当作采气、集气口(或者用分支井减压或加热)。

④ 无人值守，自动化采气，配备有实时 $P\&T$ 检测。自动化软管钻井，分支井、鱼骨井等技术正在发展、推广之中。



图 21 钻井技术(1)

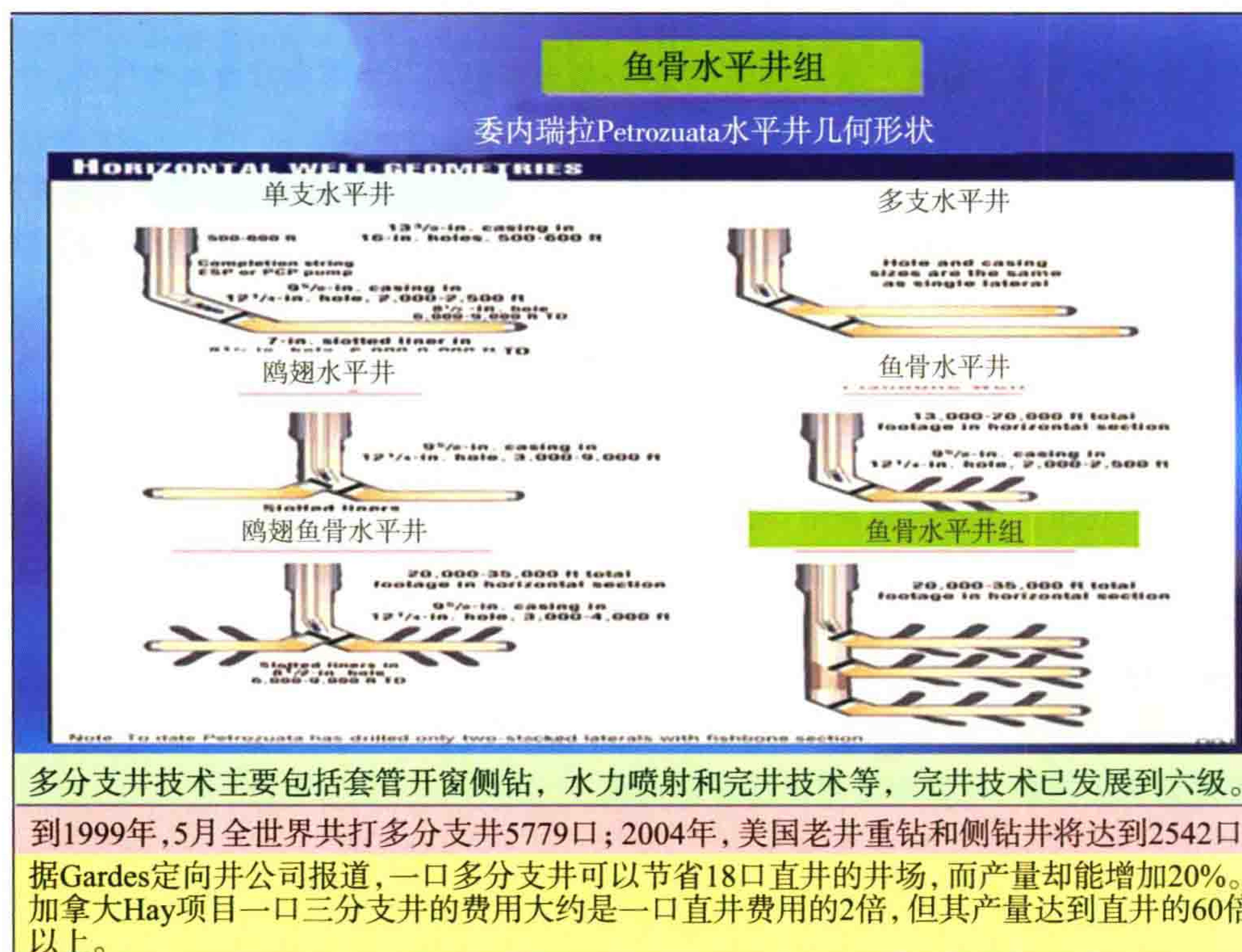


图 22 钻井技术(2)



图 23 钻井技术(3)



图 24 钻井技术(4)

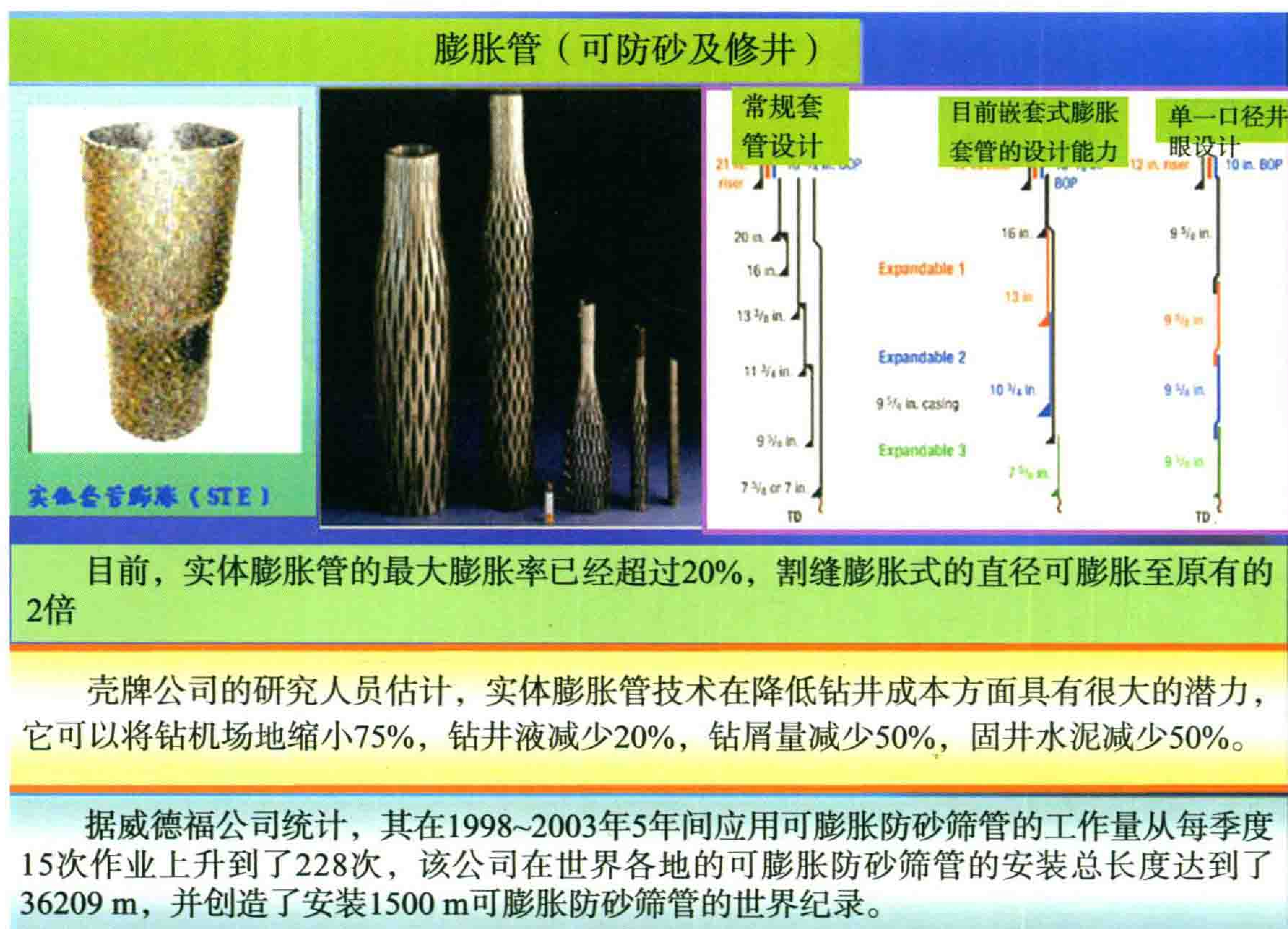


图 25　钻井技术(5)

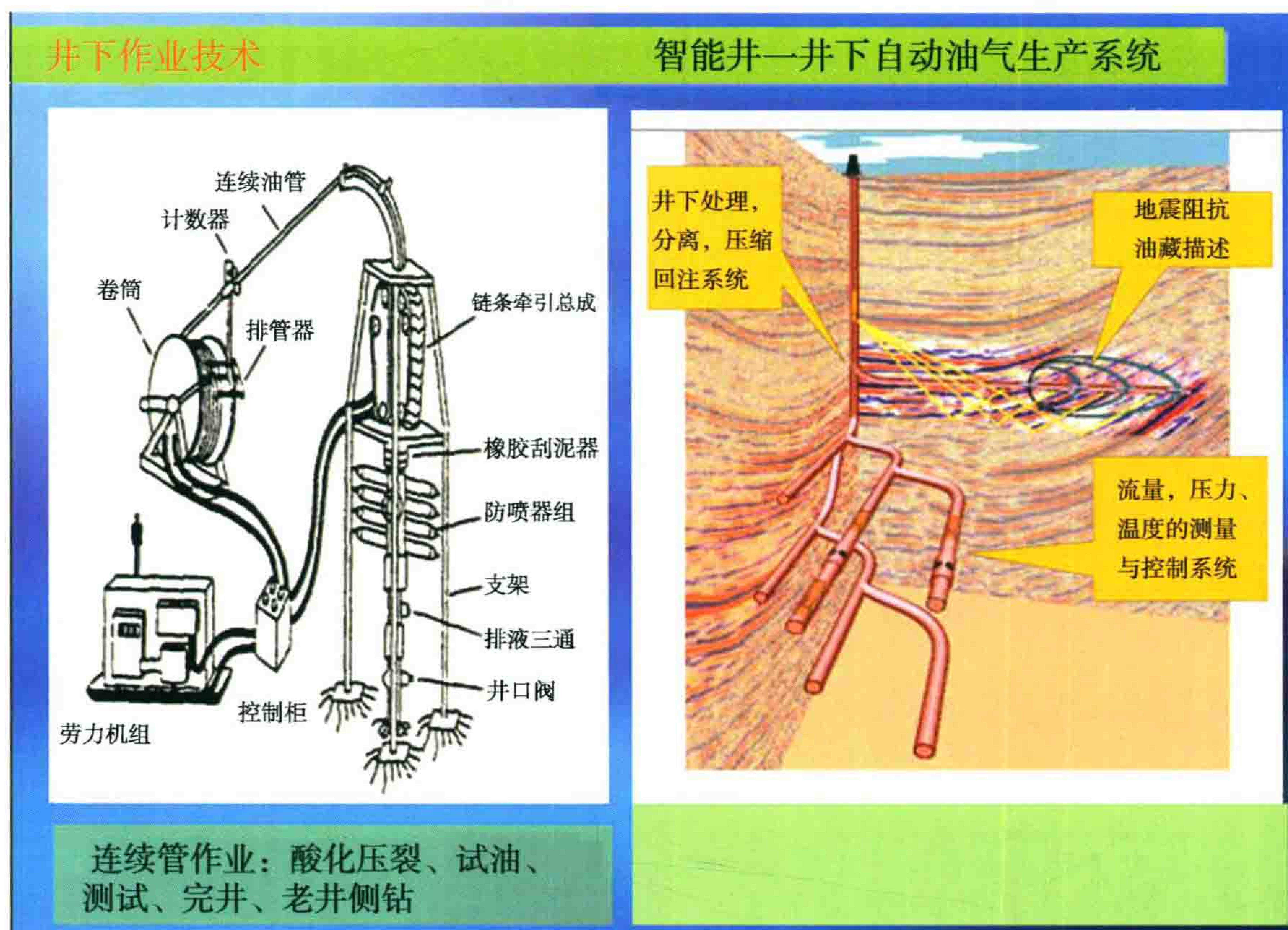


图 26　井下作业技术

结语

目前世界范围内，除了冻土带，还没有水合物正式投入生产的。据2001年报道：美国，加拿大，日本，印度等国都计划开采水合物，都宣称要在2015～2020年投入生产。到目前还没有见到动静。

目前，唯一开采的是西伯利亚冻土带。

在西伯利亚冻土带的27个油气田中，均分布有水合物，苏联地质学家于1965年在西伯利亚的麦索亚哈发现第一个水合物矿床。20世纪70年代，据14口井的试验，用甲醇处理后增产，甲烷日产量提高，由日产量15 m^3 提高到300 m^3。但到目前没有正式投入开采，因为产量太低，成本太高。

所以，我们要冷静地对待水合物的开采开发问题。

此外，应考虑我国的实力和条件，加强国际合作、多做调研。

文章编号 311

拓频与真假分辨率

——珍惜已经获得的地震剖面分辨率

这是 2012 年 2 月，我在东方地球物理公司研究院的讲课稿。

我发现近年来我国处理的地震资料虽然在信噪比方面有所提高，但是往往忽略了分辨率的提高。原因是叠前偏移是一种很强的低通滤波，我们做完叠前偏移后，忘了再做一次“偏后反褶积”或“谱白化”。把已经到手的分辨率没有充分“表达”出来。

我的几个博士生通过实践证明这“偏后反褶积”还是很起作用的。

近年来出现不少小公司采用“拓频”方法，使地震记录的分辨率得到极大的提高。有些是真，有些是假。那么如何判断真假呢？

本文给出了答案：还是归结到我不断提倡的“分频扫描是判断好坏的唯一标准”。它应该贯彻在资料采集到处理、解释的全过程。

内容

(1) 叠加及偏移是严重的低通滤波，出站剖面未做分频扫描，没有调查“有效频宽”，习惯上又不做“偏后反褶积”，所以主频越来越低。

(2) 种类繁多的拓频处理，我们要分辨是否是假剖面。

(3) 覆盖次数越来越多，道数多了，炮检距越来越大，主频更偏低。

(4) 盲目追求简单地区不必要采用的“新技术”。大排列的“VTI”视各向异性处理，又例如逆时偏移(全波偏移等)。

(5) 为了三维资料联片，“有效频宽”只能迁就差的区块，通频带进一步变窄。

(6) 要重视通过拟合 T_0 道(DELFIT)展宽频谱。

本文提出了补救改进措施。

一、出站剖面忘了做“偏后反褶积”

偏移过程和水平叠加一样，是一个严重的低通滤波过程。20 世纪 80 年代，国外普遍使用叠后反褶积，现在偏后反褶积却被人们遗忘了。今年 2 月，上海物探高层会议上，我提出了**应该重视“偏后反褶积”**。

我们先通过实例来看一下偏后反褶积的效果。

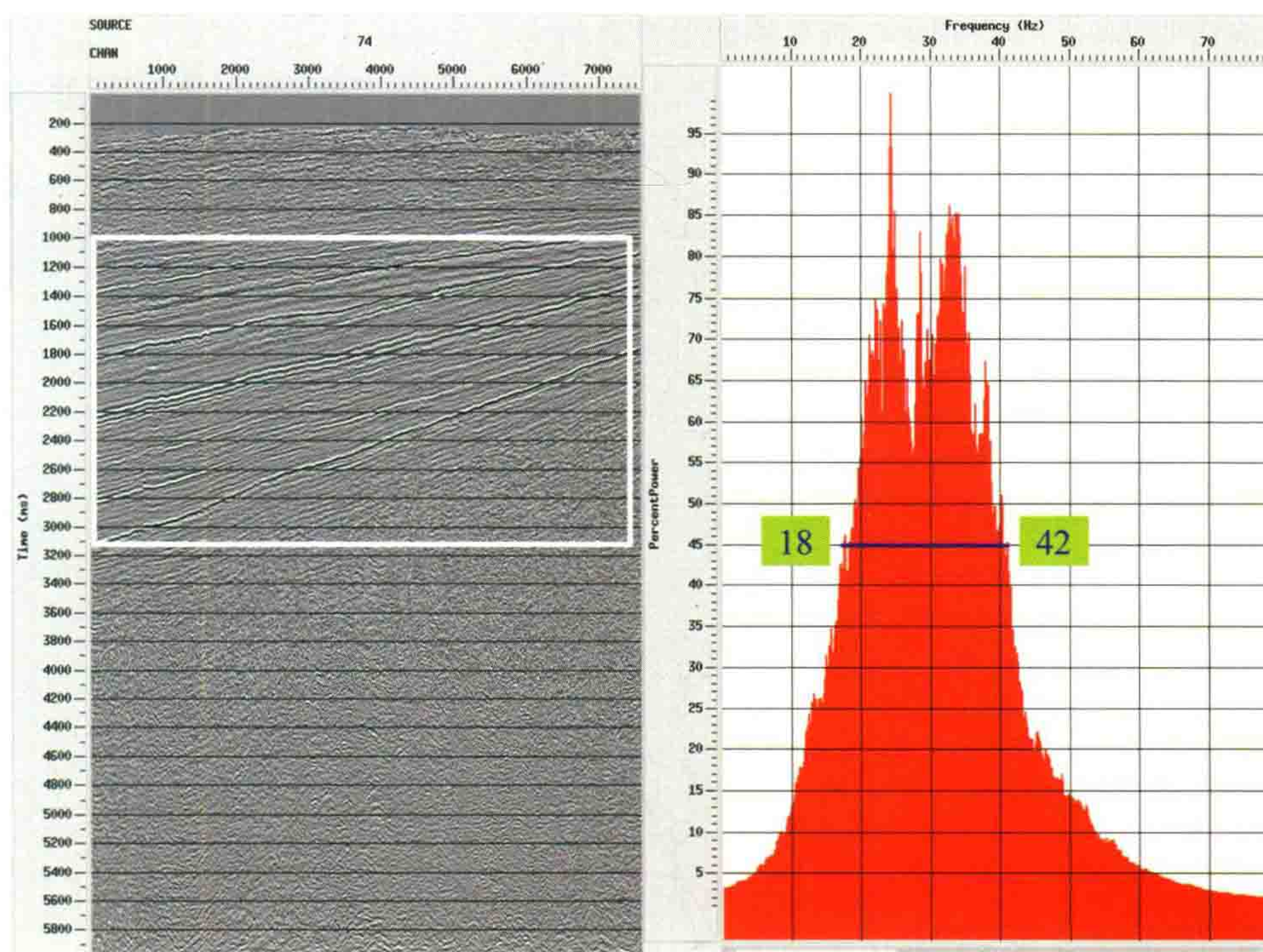


图 1 某地资料原始出站偏移剖面及其频谱

第一个例子是我的学生张红军所提供的资料。

我们先看一下频谱对比。图 1 所示为在秘鲁新采集(炸药震源)资料的原始出站偏移数据及其频谱。原始出站偏移数据的频谱中频带宽度只有 18～42 Hz,但是频率扫描却表明在 18 Hz 以下 5～10 Hz 和 42 Hz以上 90 Hz 左右还有有效信息。

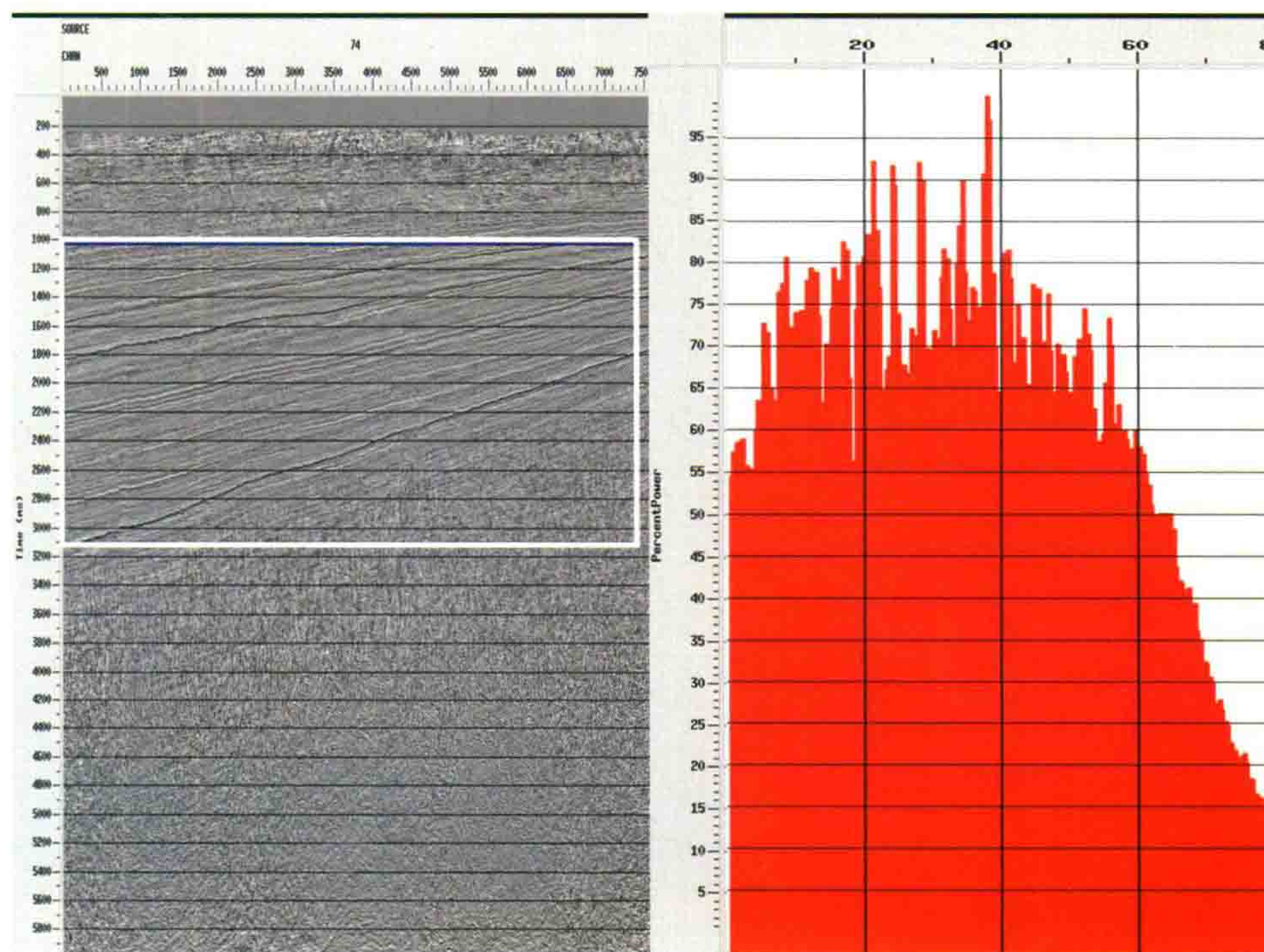


图 2 某地资料原始偏移数据＋偏后反褶积后的剖面及频谱

图 2 所示的为该资料对原始偏移数据进行偏后反褶积后的剖面及其频谱,可以看到其频谱扩展为 5～65 Hz,这个频谱是在偏后反褶积后直接做的,没有进行滤波,低频部分可能由直流分量所引起。

我们再看剖面对比。图 3 所示为该资料原始偏移数据未做任何加工的出站剖面(全部数据显示),图 4 所示为原始偏移数据+偏后反褶积剖面(全部数据显示),可看到图上**红圈绿圈中反褶积后,剖面上的不整合现象有明显的改进**。图 5 和图 6 分别为图 3、图 4 部分放大的剖面显示。



图 3　原始偏移数据未做任何加工的出站剖面(全部数据显示)

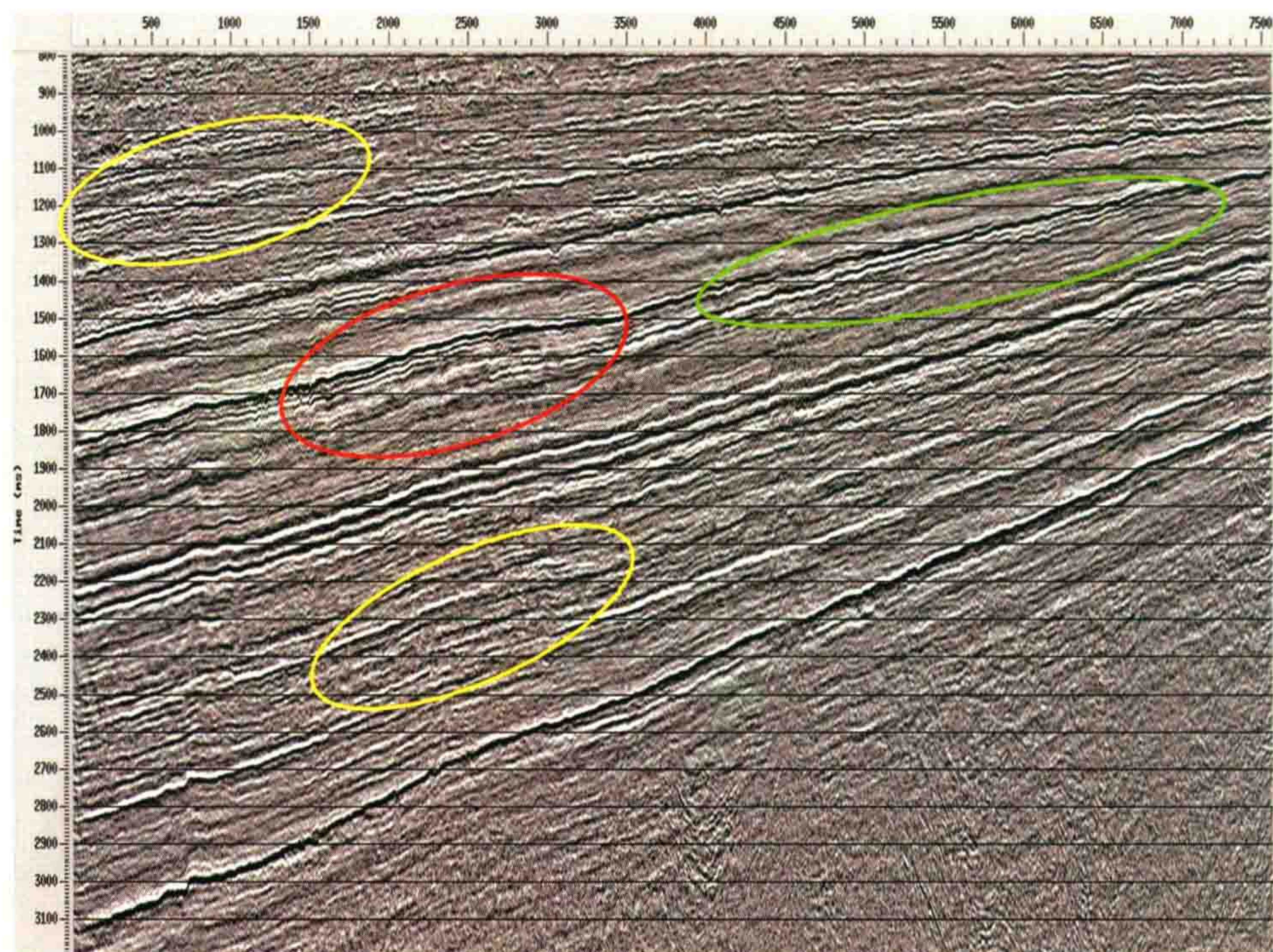


图 4　原始偏移数据+偏后反褶积剖面(全部数据显示)

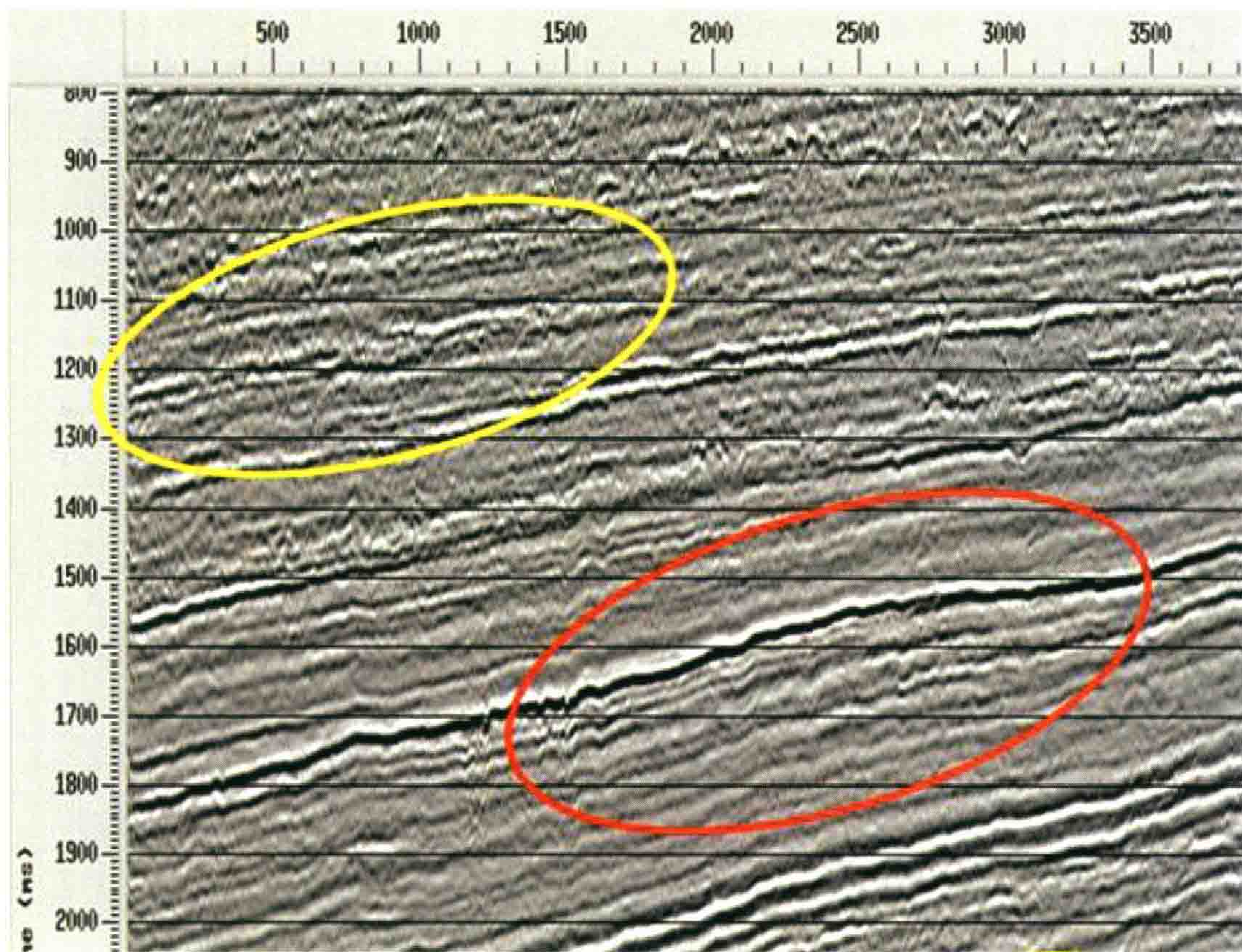


图 5 原始偏移数据未做任何加工的出站剖面(部分放大显示)

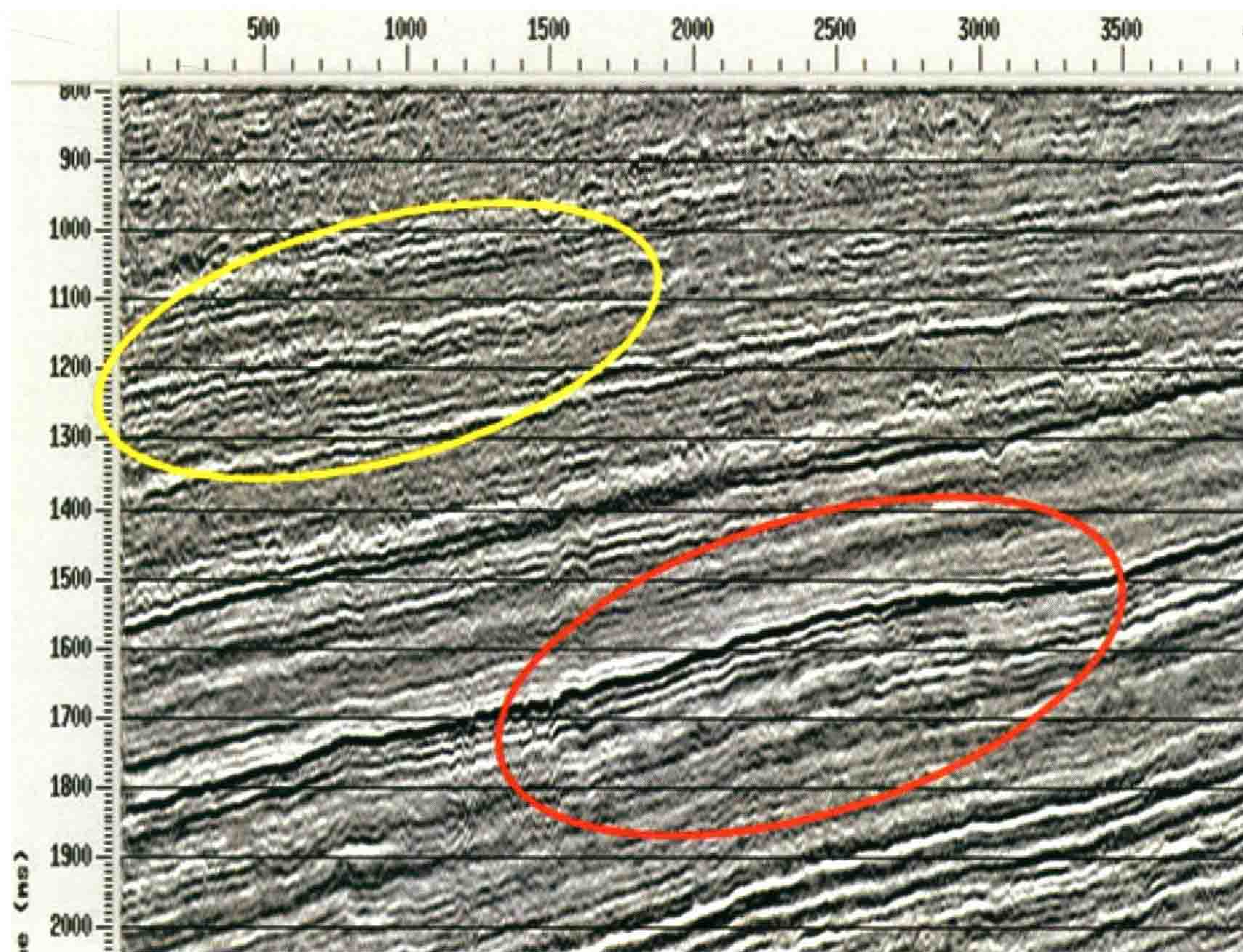


图 6 原始偏移数据+偏后反褶积剖面(部分放大显示)

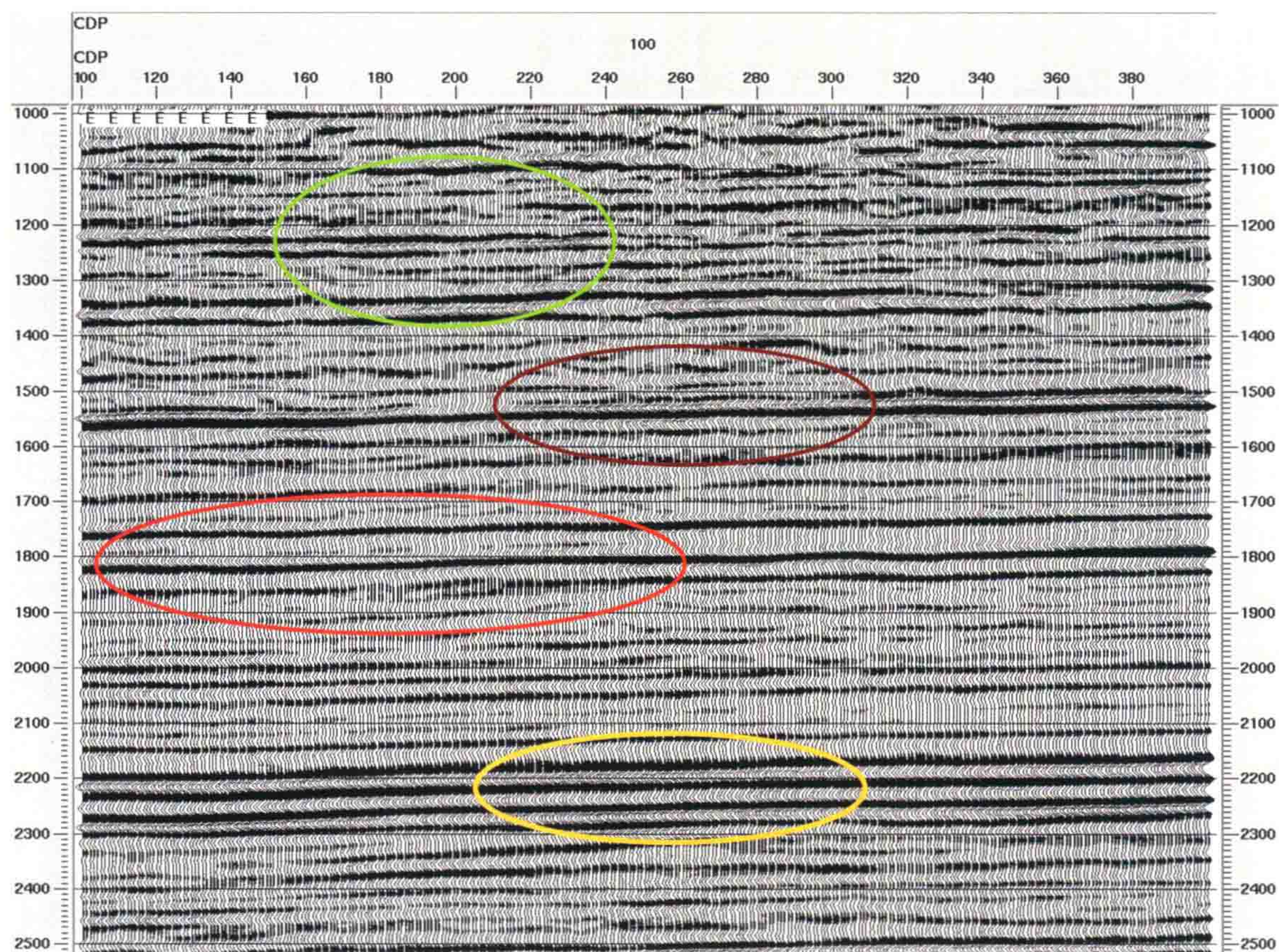


图 7 原始偏移数据的纯波显示

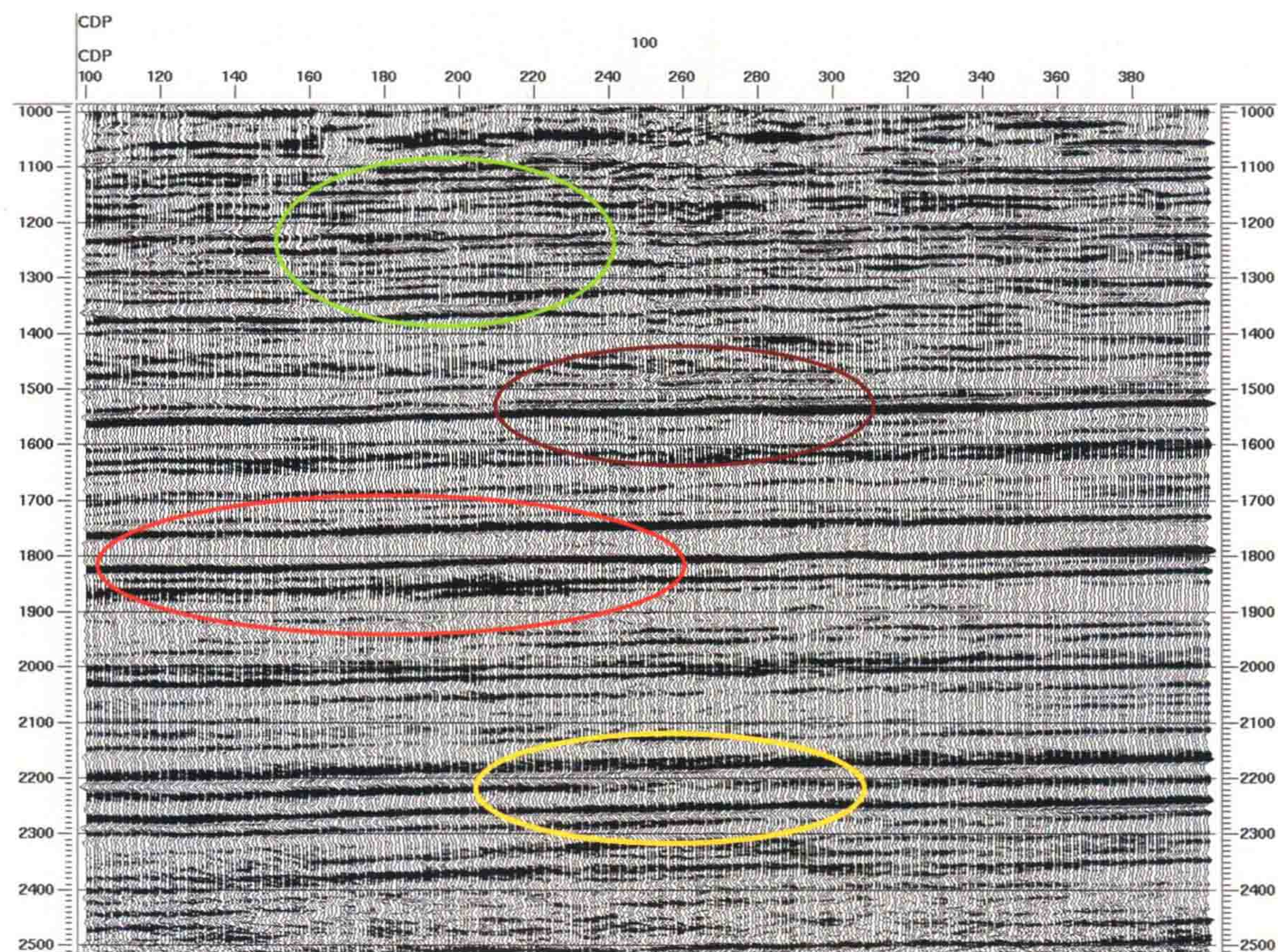


图 8 原始偏移数据+偏后反褶积数据纯波显示

我们再看一下图 7 和图 8 的纯波剖面对比，**原始偏移数据的频谱中频带宽度只有 18～42 Hz，偏移数据经反褶积后，频谱中频带宽度拓宽到 2～62 Hz**。

且看反褶积前后的分频扫描的对比情况。

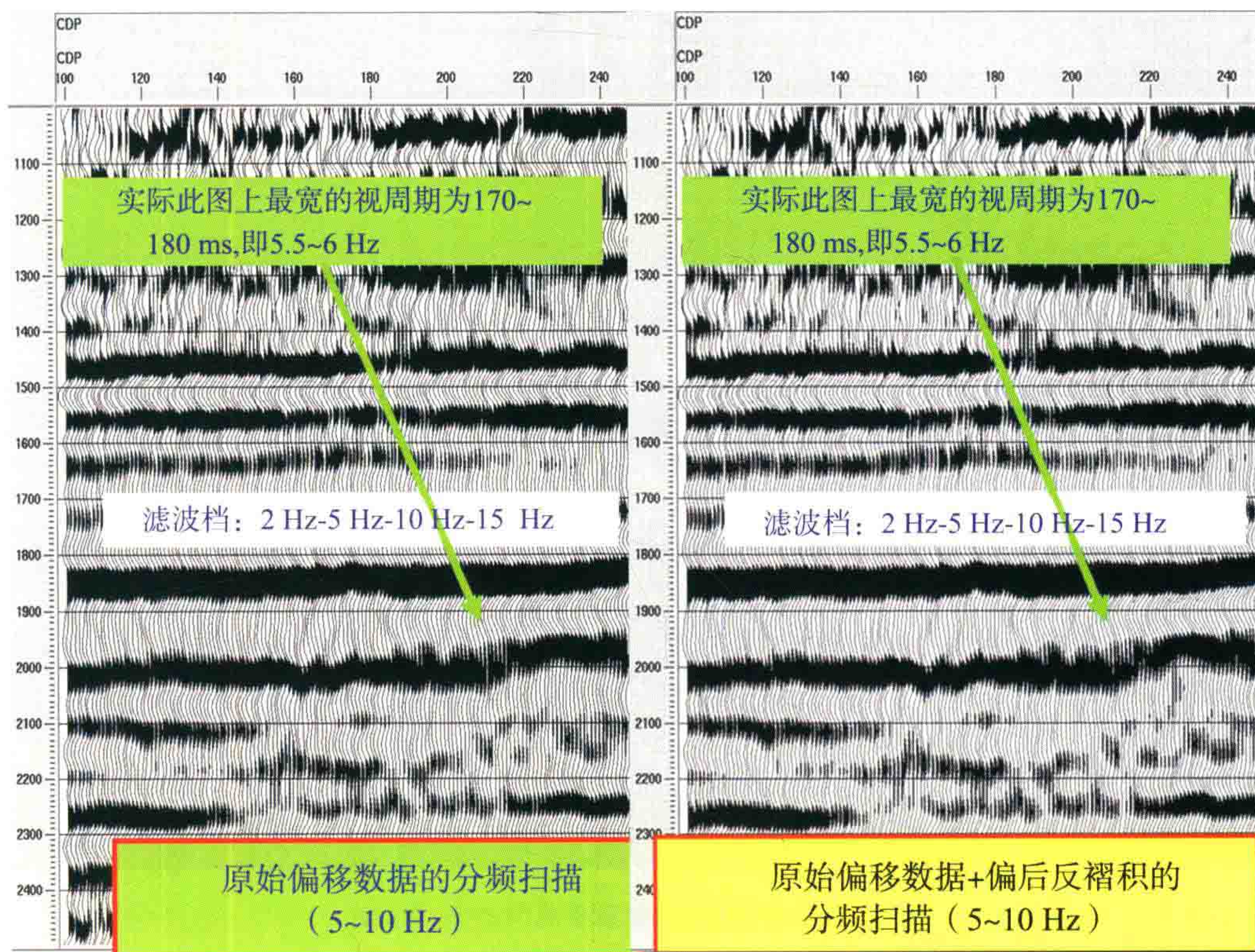


图 9　分频扫描对比图(频率范围 5～10 Hz)

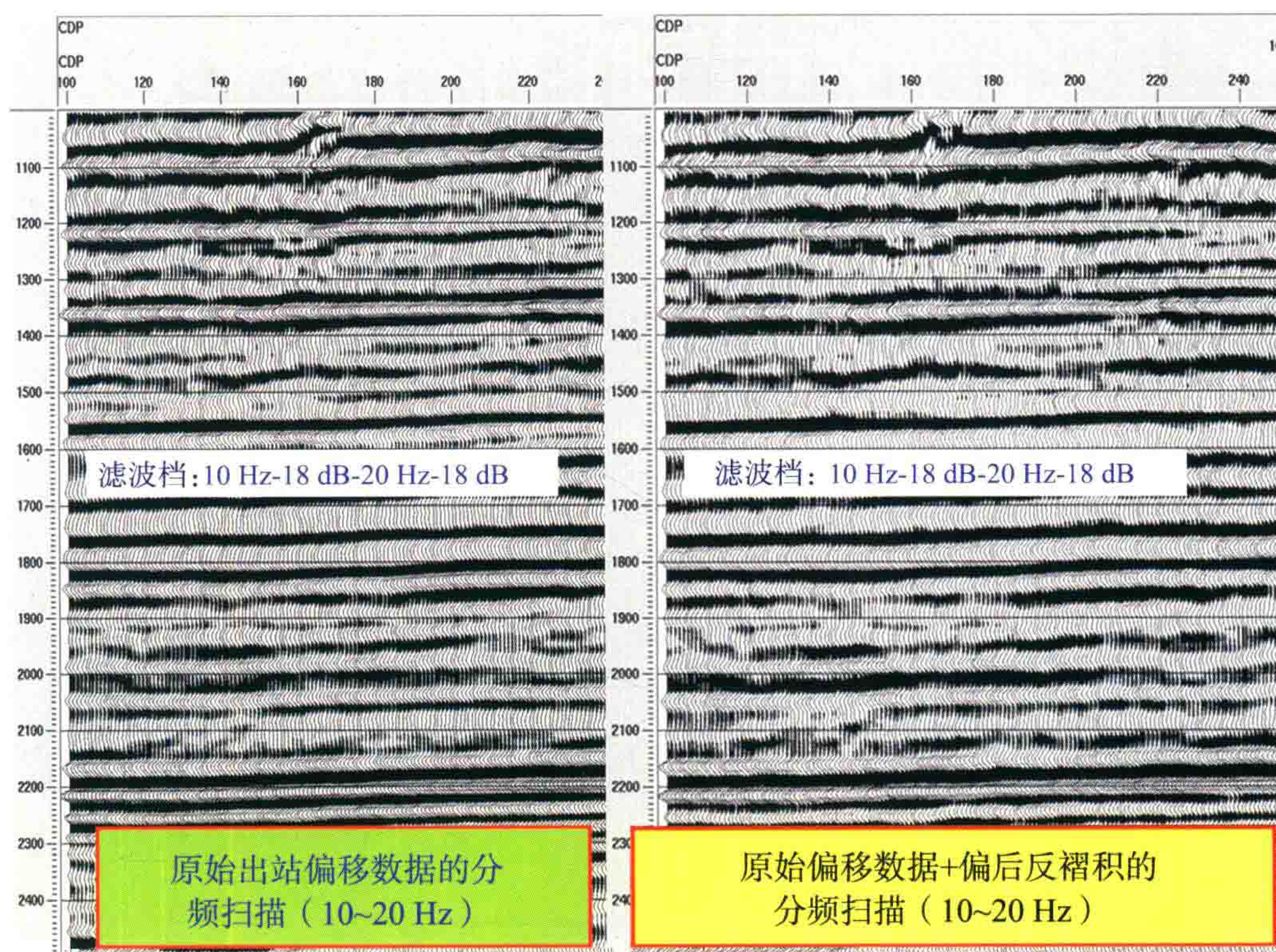


图 10　分频扫描对比图(频率范围 10～20 Hz)

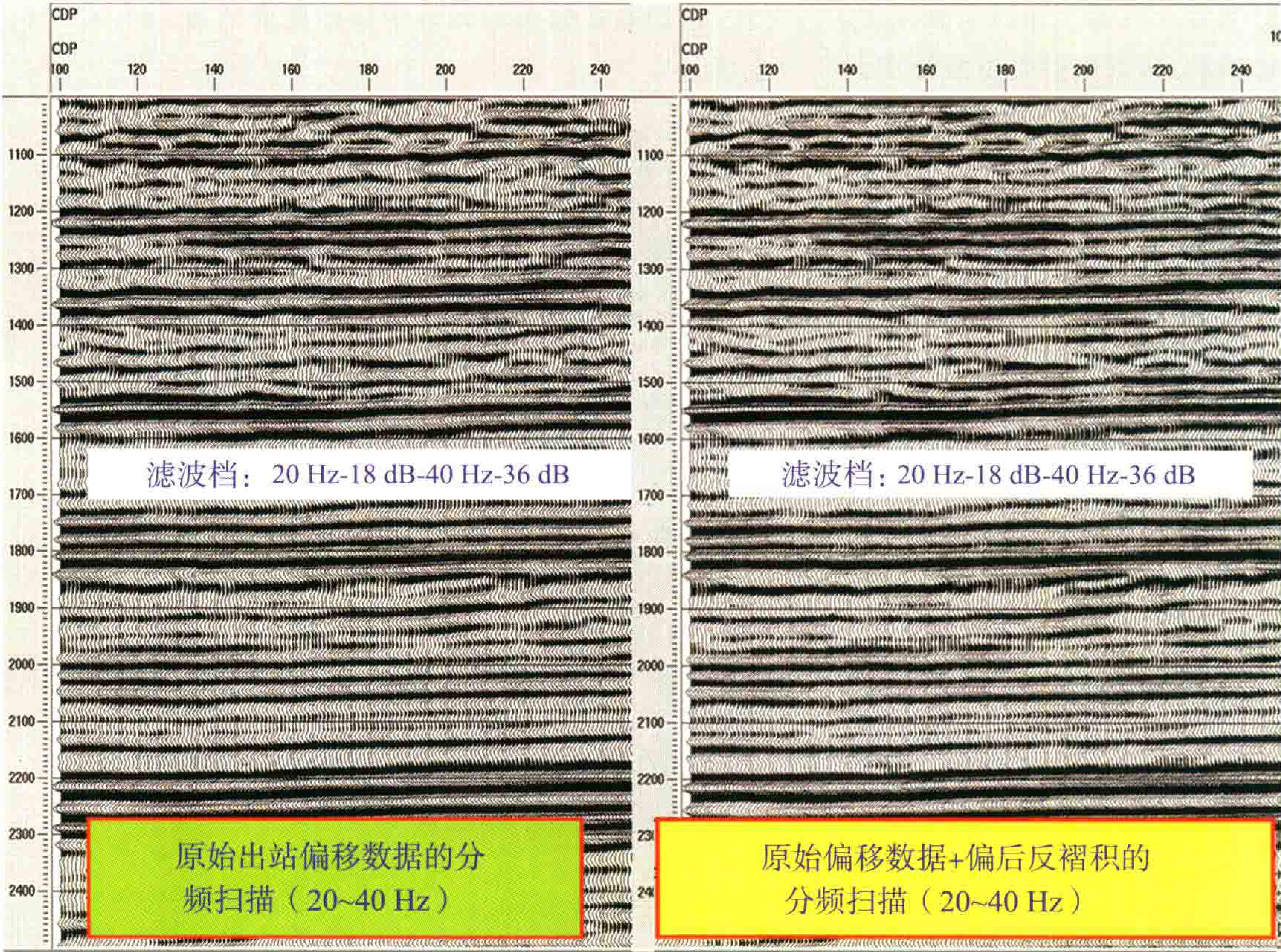


图 11　分频扫描对比图(频率范围 20～40 Hz)

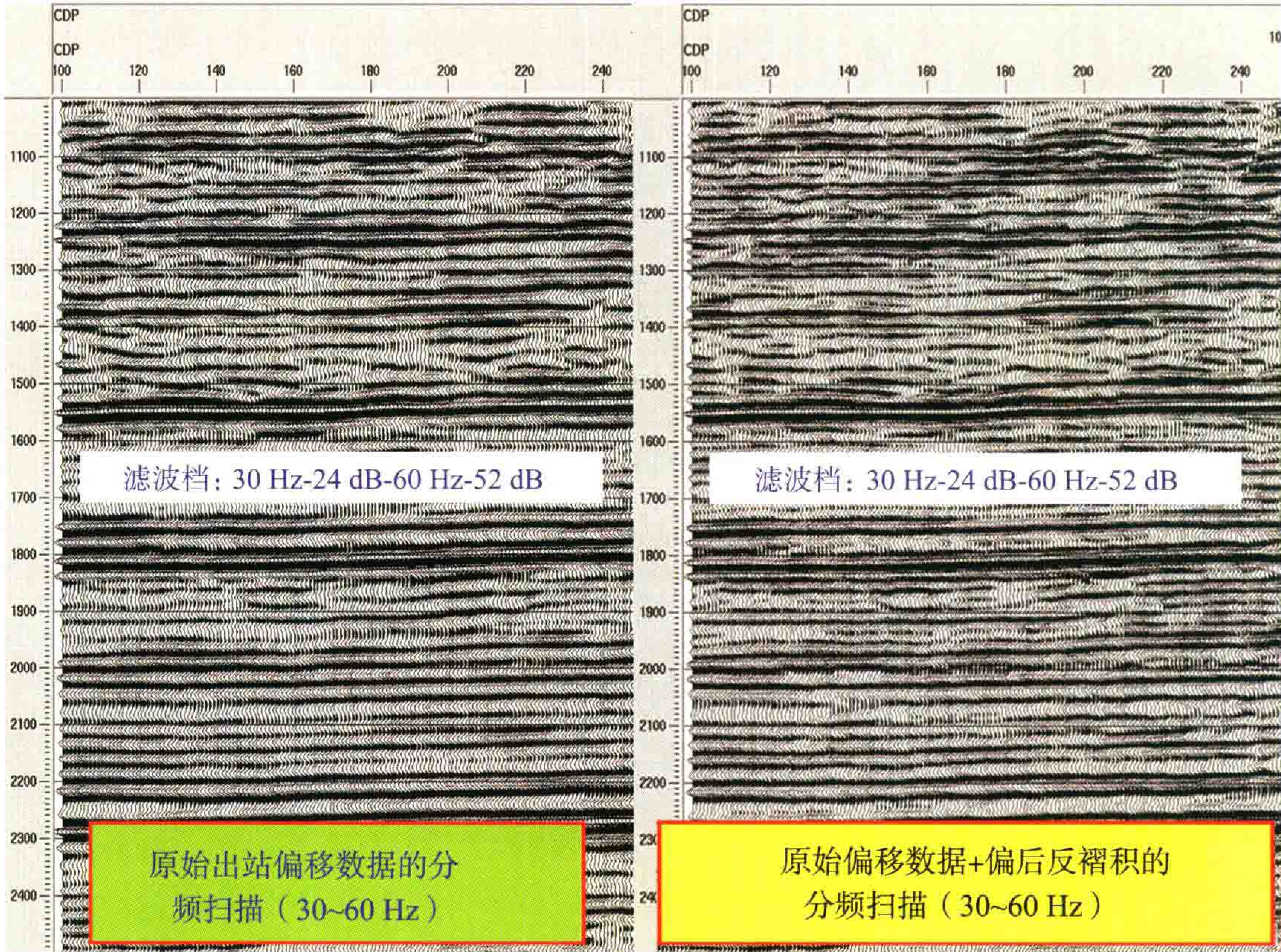


图 12　分频扫描对比图(频率范围 30～60 Hz)

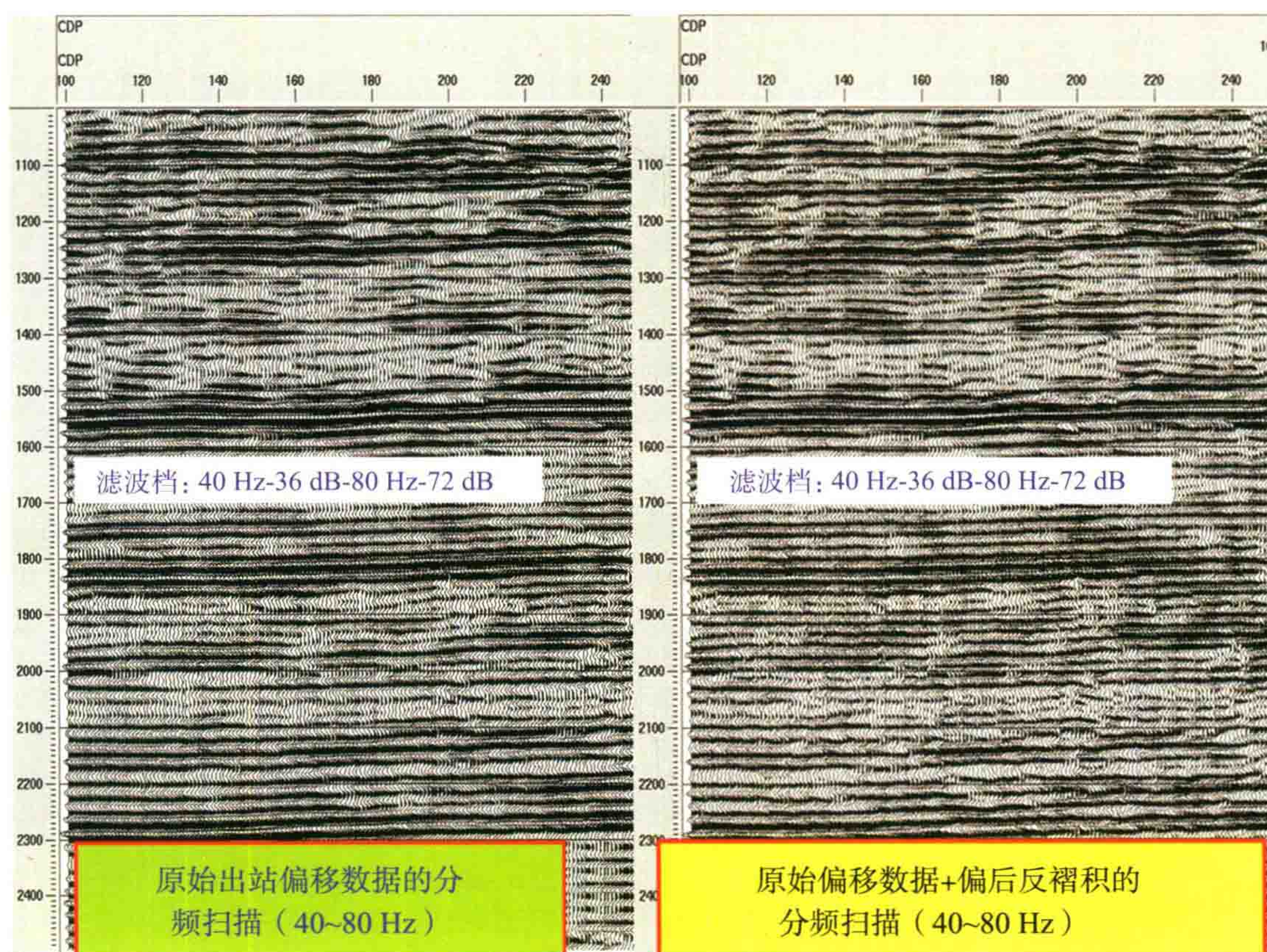


图 13　分频扫描对比图(频率范围 40～80 Hz)

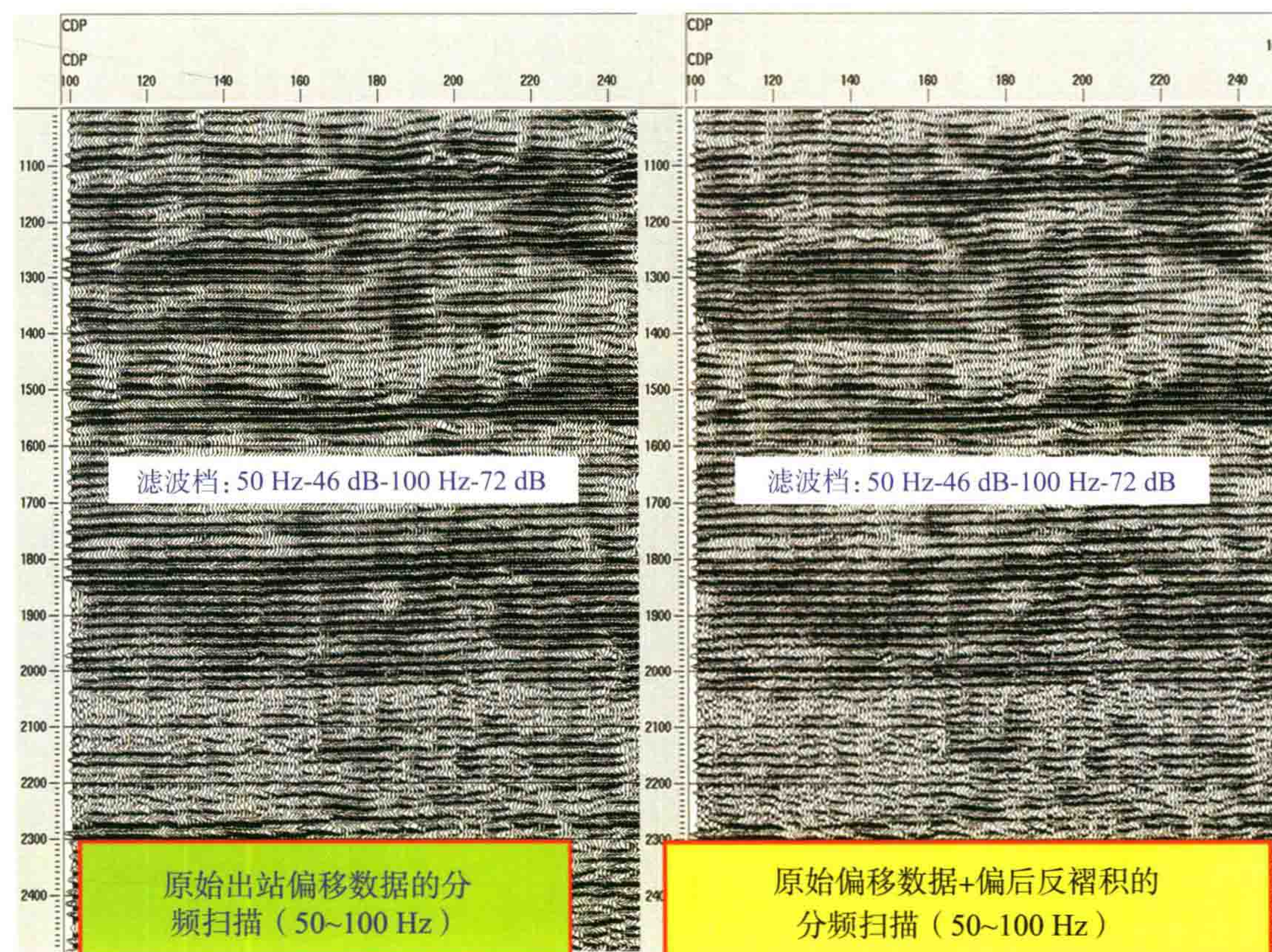


图 14　分频扫描对比图(频率范围 50～100 Hz)

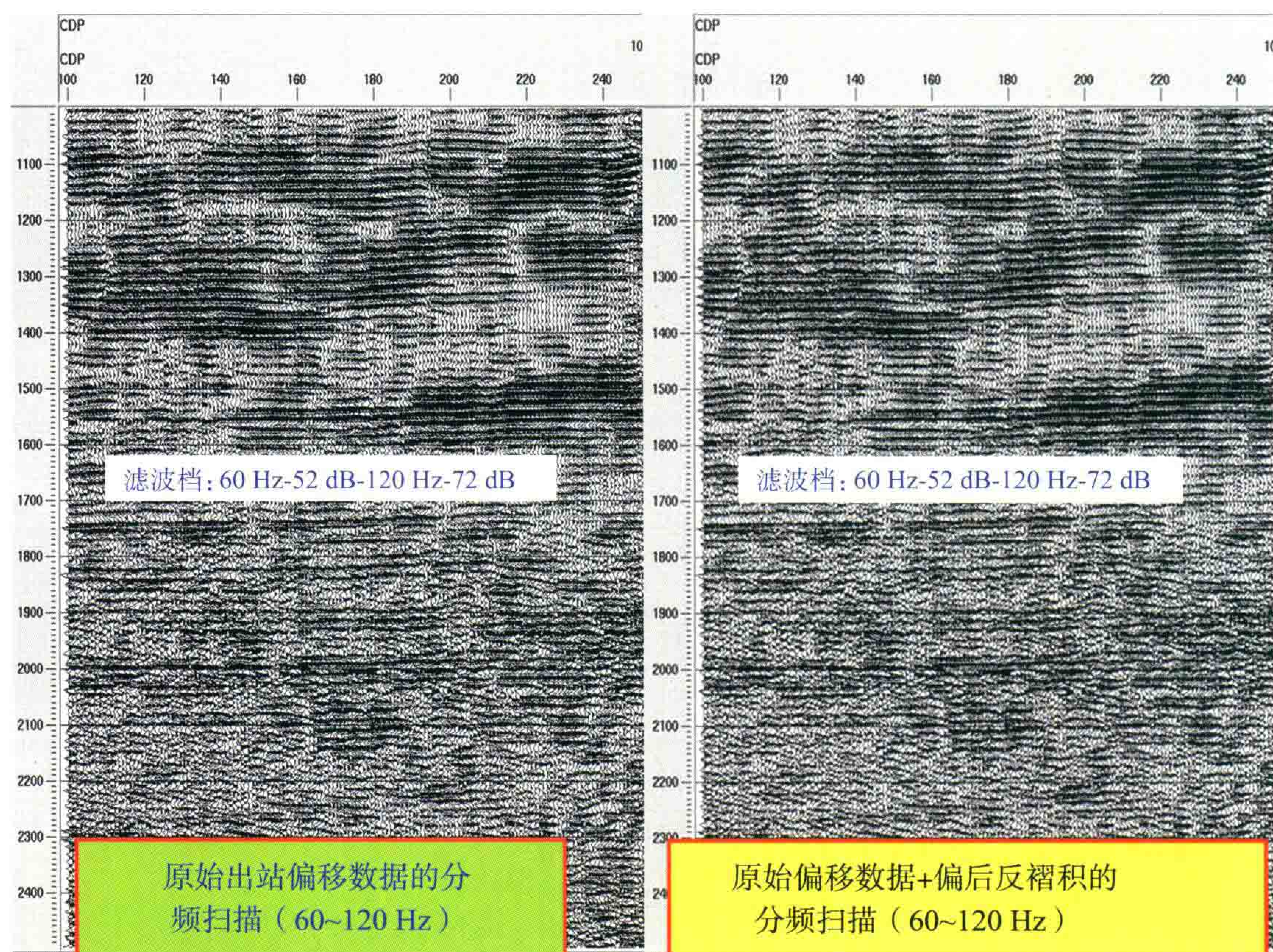


图 15　分频扫描对比图(频率范围 60～120 Hz)

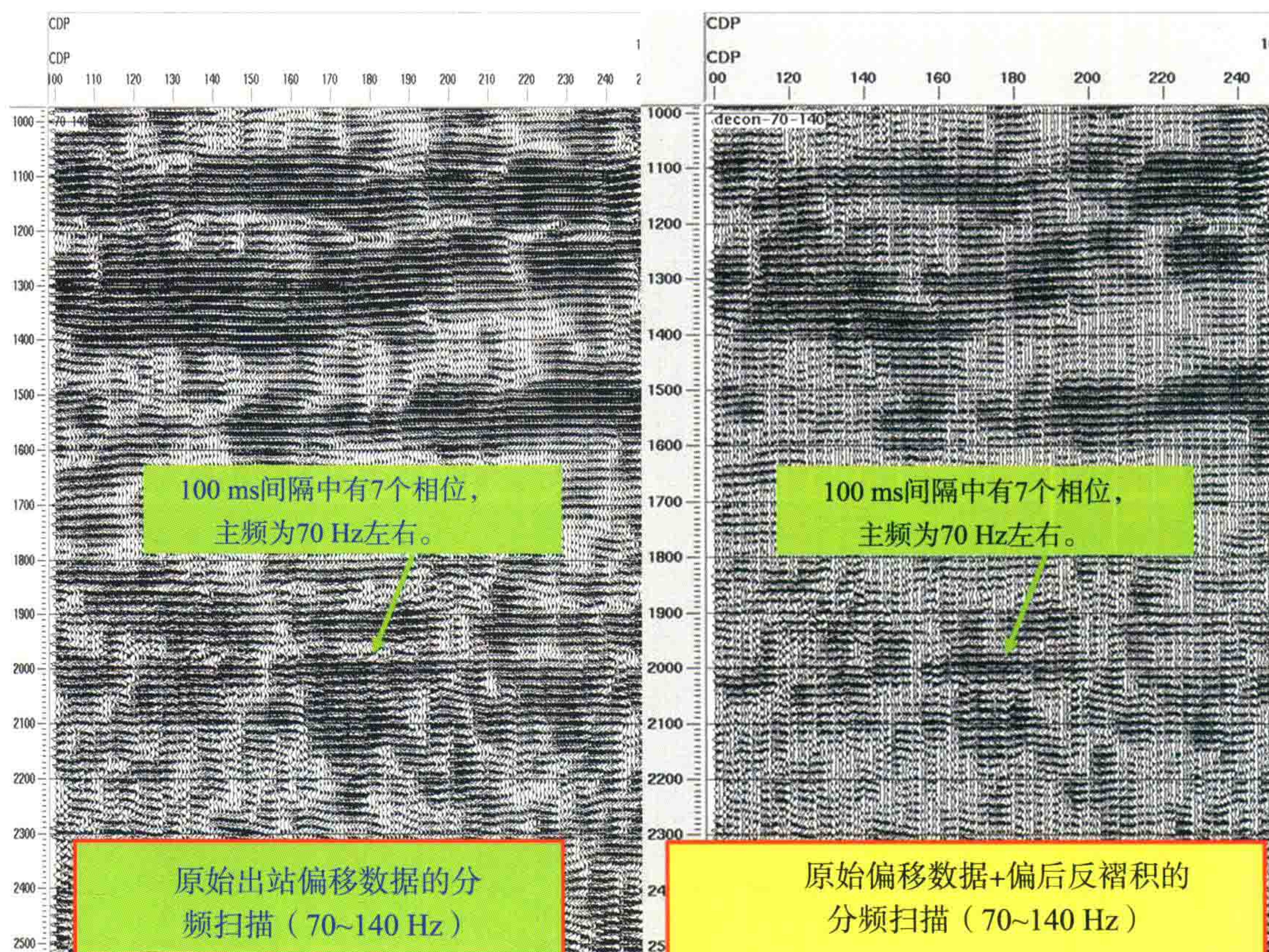


图 16　分频扫描对比图(频率范围 70～140 Hz)

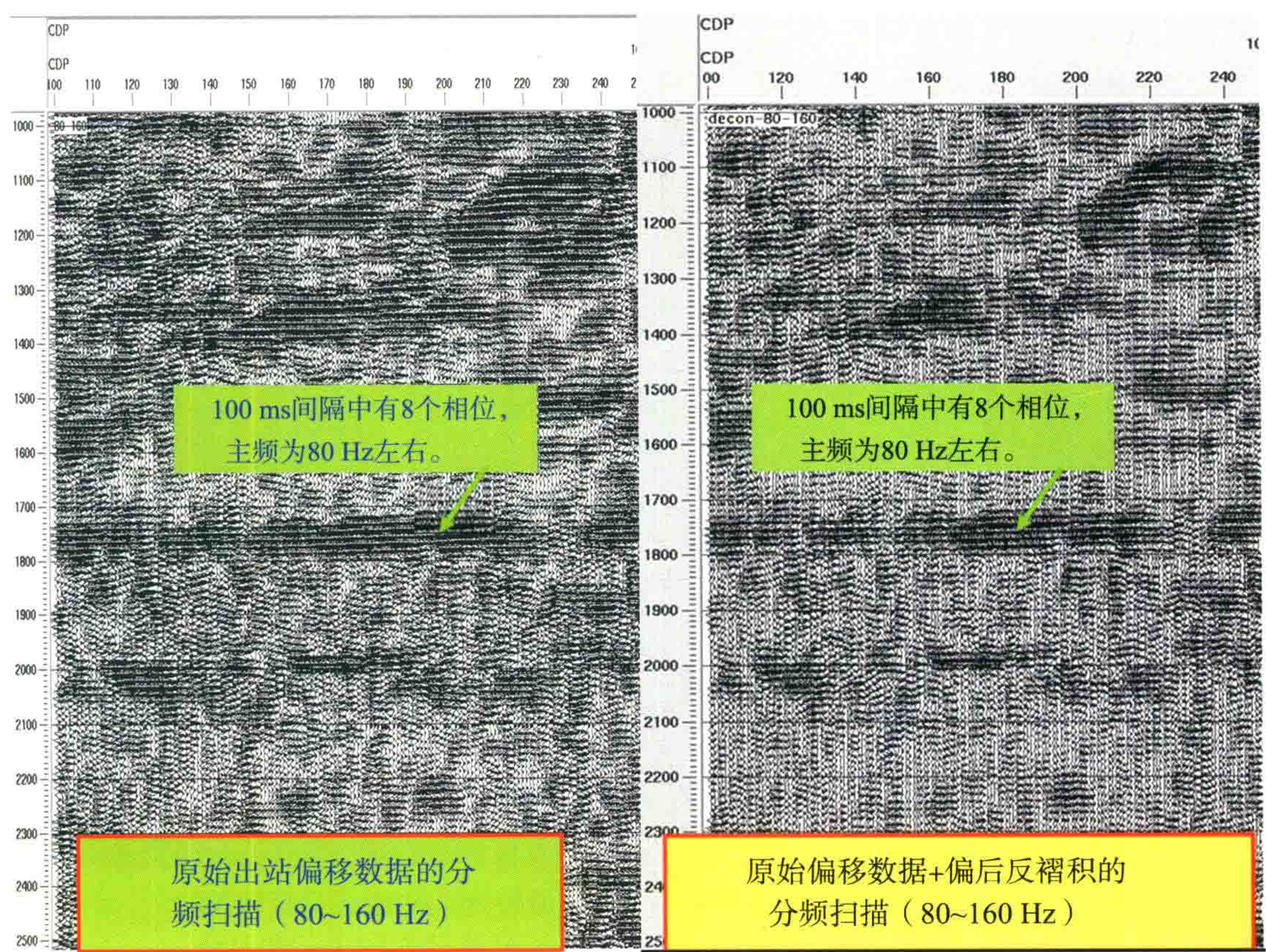


图 17 分频扫描对比图(频率范围 80～160 Hz)

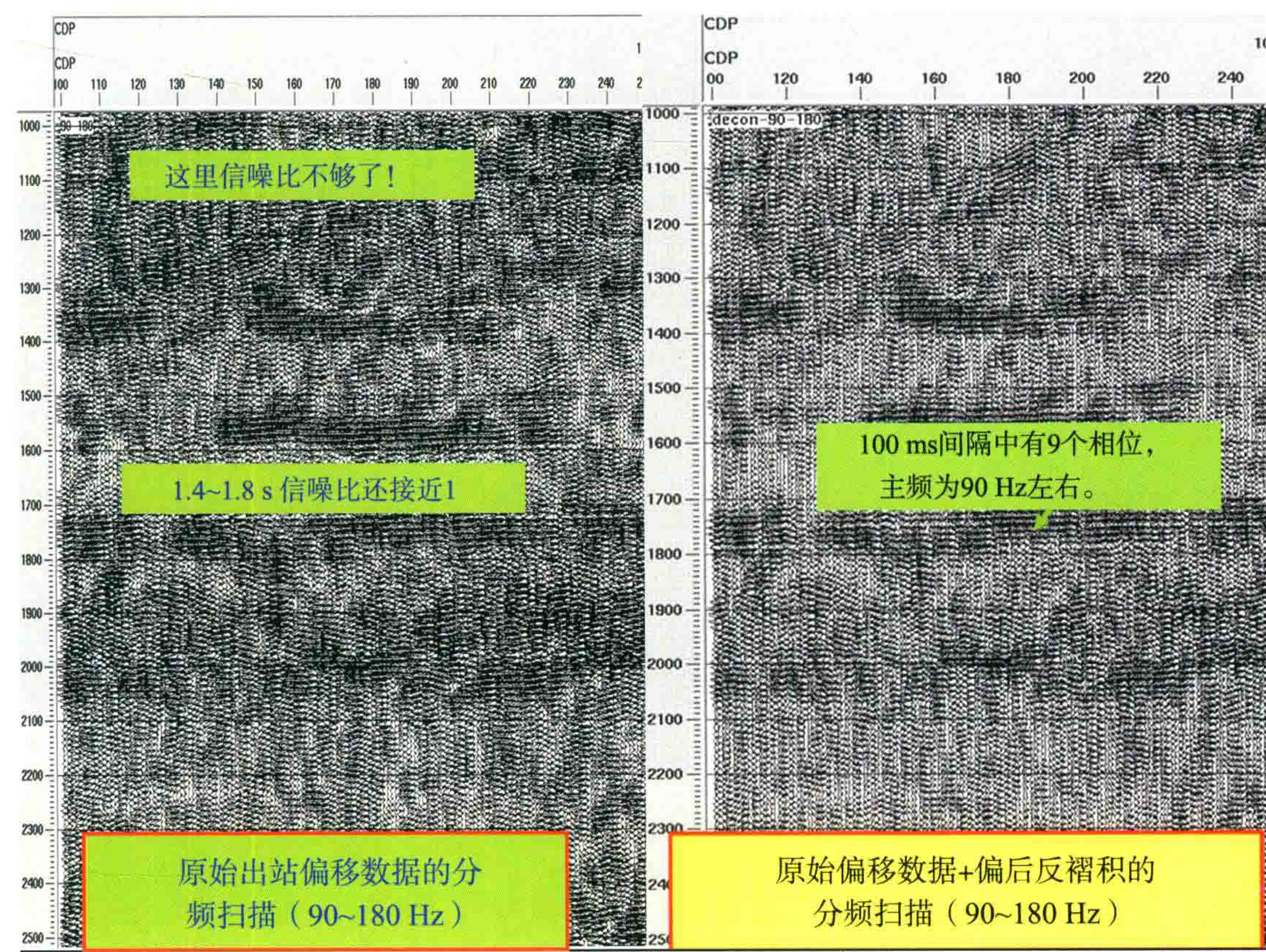


图 18 分频扫描对比图(频率范围 90～180 Hz)

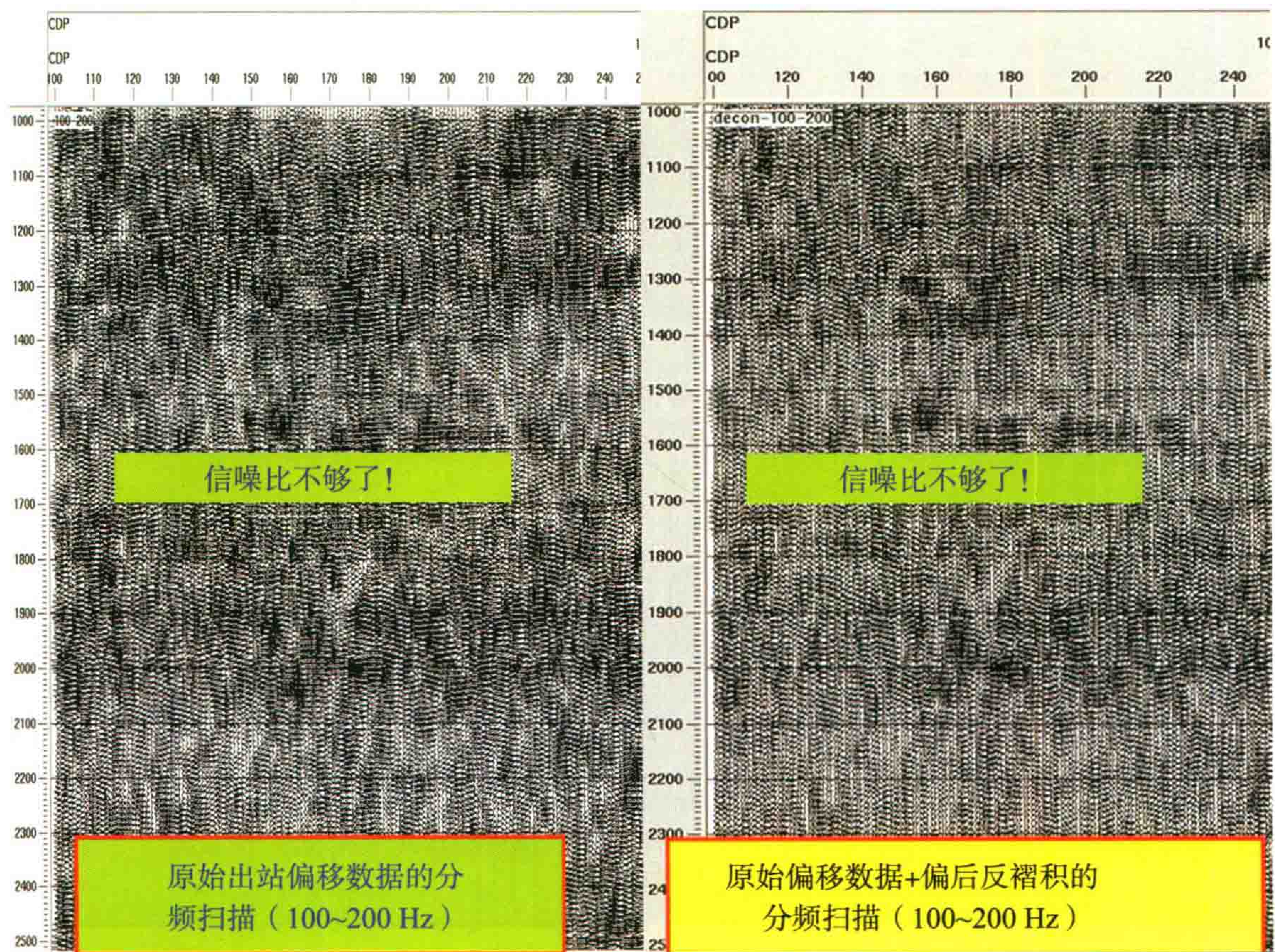


图 19　分频扫描对比图(频率范围 100～200 Hz)

从以上的分频扫描对比图 9～图 19 可以看出，偏后反褶积与不反褶积的分频扫描结果相近。这进一步证明了**“反褶积并不改变每一个频率成分的信噪比”**。所以反褶积前后的分频扫描图幅十分相似，有效频宽是一样的。但是，从整个剖面来看，反褶积改变了“视觉分辨率”，这对最终剖面的解释是有利的。

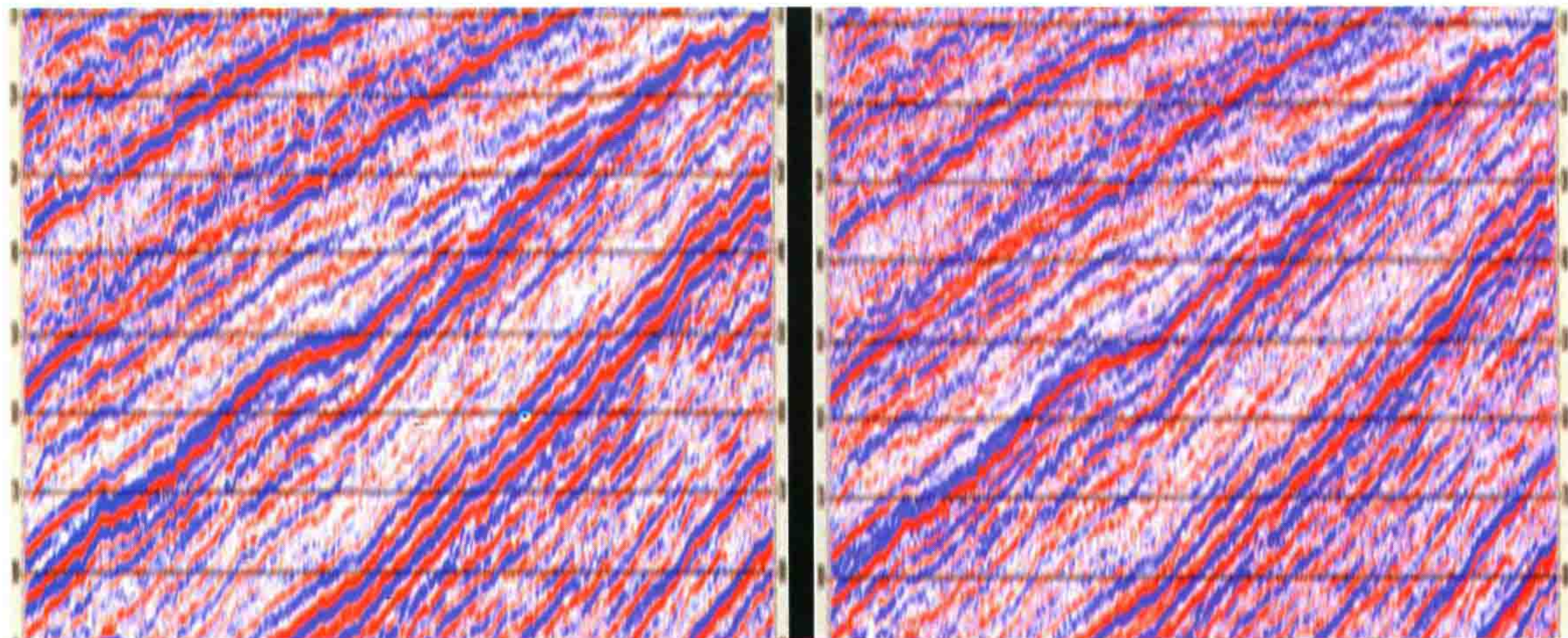


图 20　原偏移剖面(左)与加偏后反褶积剖面(右)对比

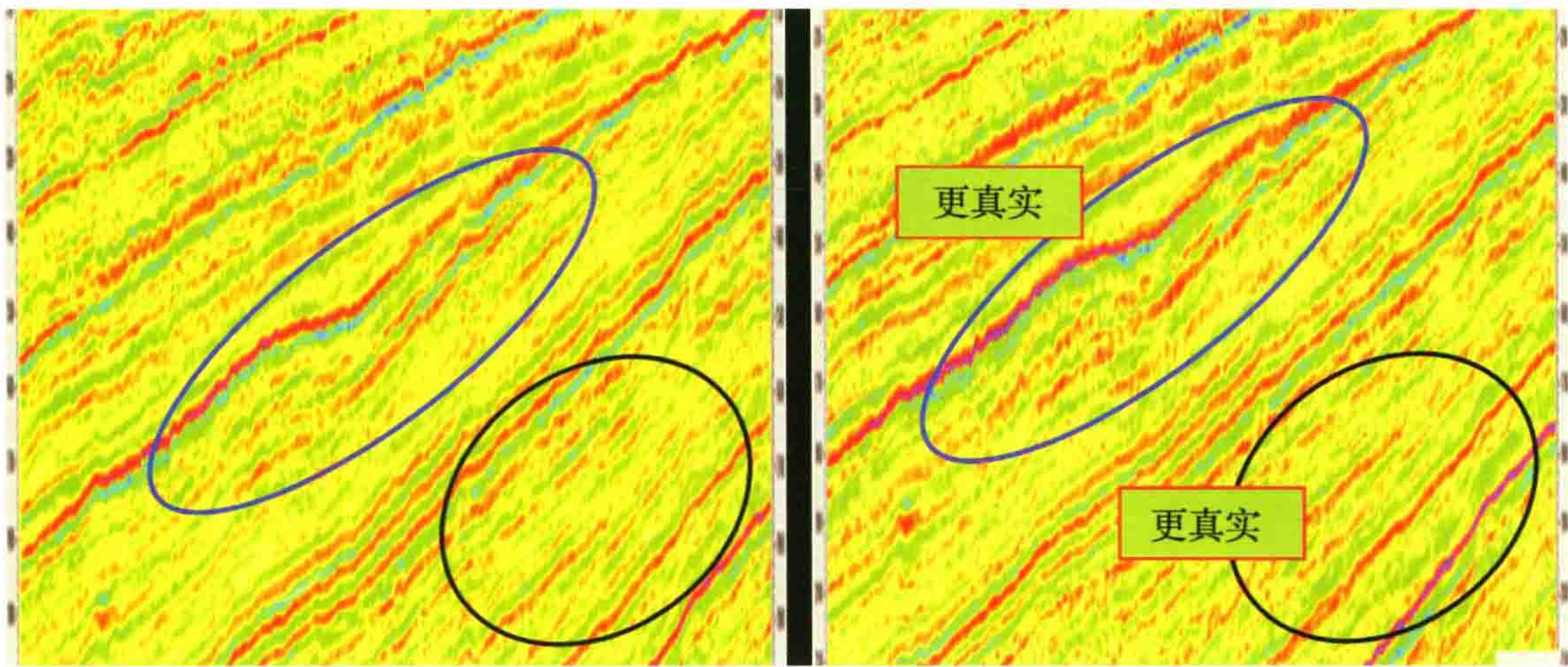


图 21 利用原数据(左)与加反褶积(右)数据所做波阻抗剖面对比

图 20 为两数据的彩色剖面对比,右面的剖面频带较宽。图 21 所示为用两数据体所做出的波阻抗反演剖面对比,加反褶积后的反演剖面表现更真实一些。**只有频带宽的剖面作波阻抗反演后数据更真实。**

第二个例子是根据丁在宇资料,该资料是大港地区的资料,也是炸药震源资料。

图 22 所示为该资料的原始出站偏移剖面,图 23 为原始偏移+偏后反褶积(GAP 浅层 24 ms,深层 32 ms)剖面,两剖面对比,后者分辨率明显提高。

图 24 为两者剖面部分放大后的效果比较,后者地质效果显示比前者也好。

图 25 为两者的频谱图对比,经反褶积后,频谱有明显的展宽。

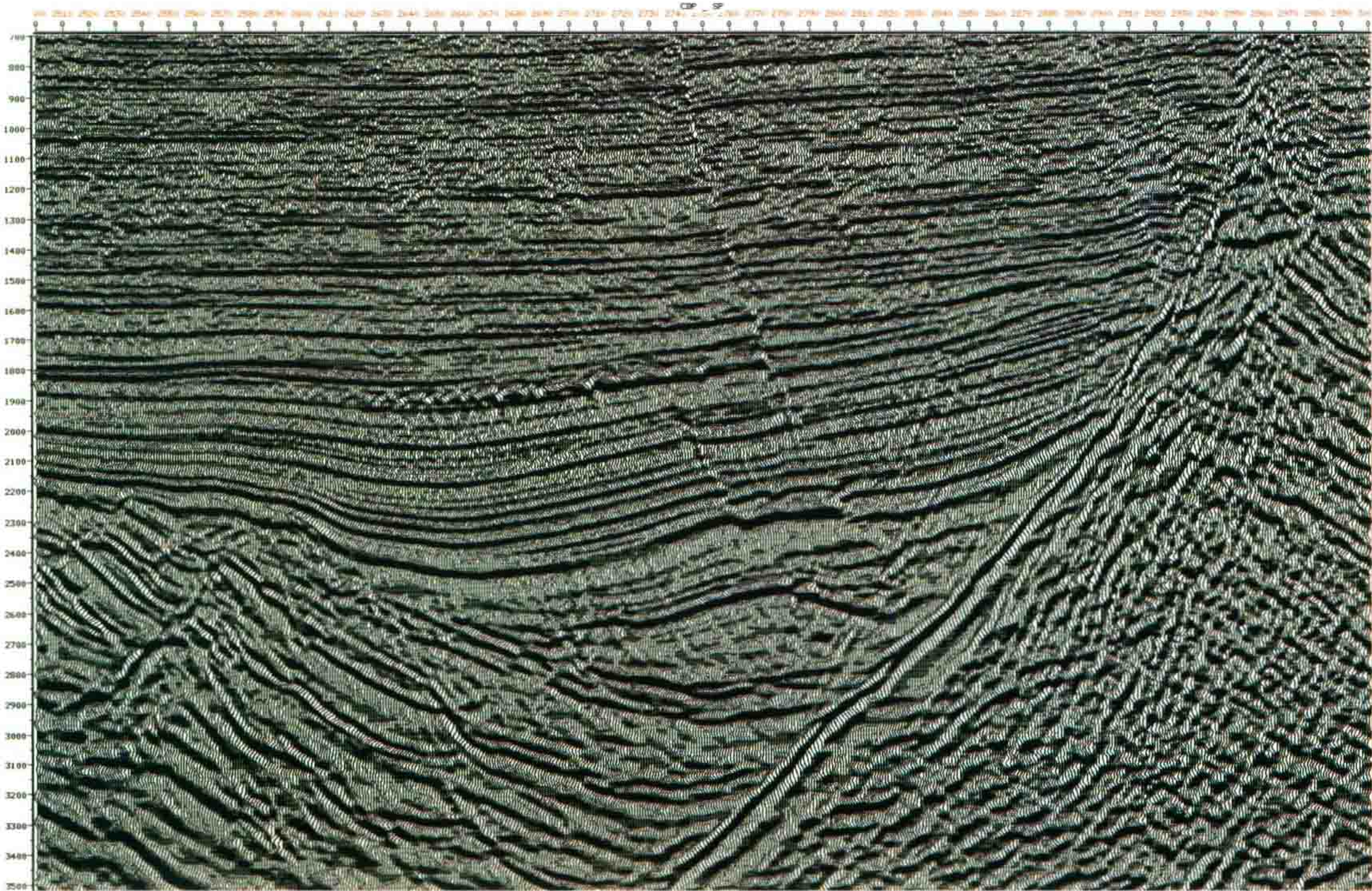


图 22 原始出站偏移剖面

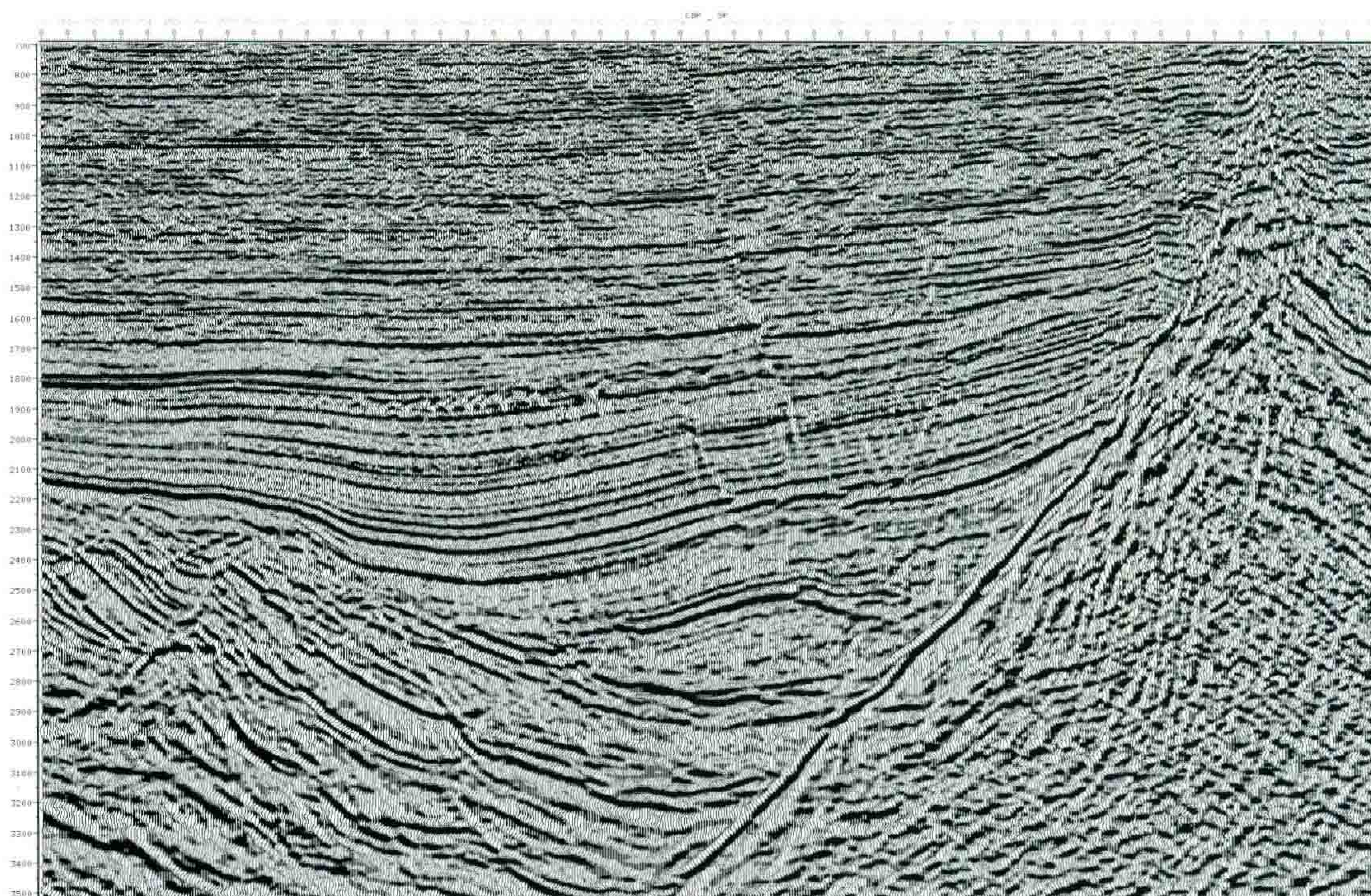


图 23　原始偏移＋偏后反褶积(GAP 浅层 24 ms,深层 32 ms)剖面

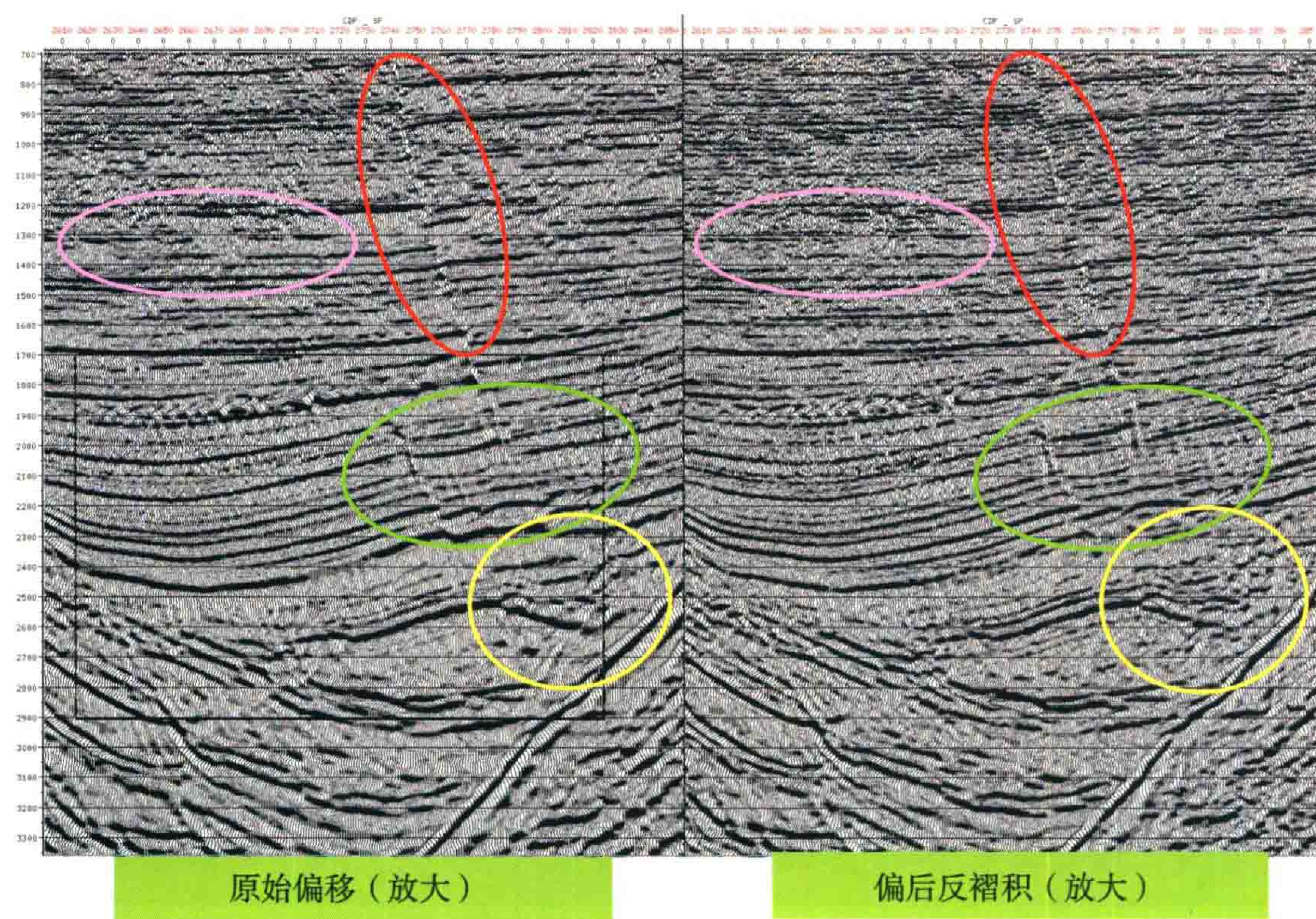


图 24　剖面地质效果比较

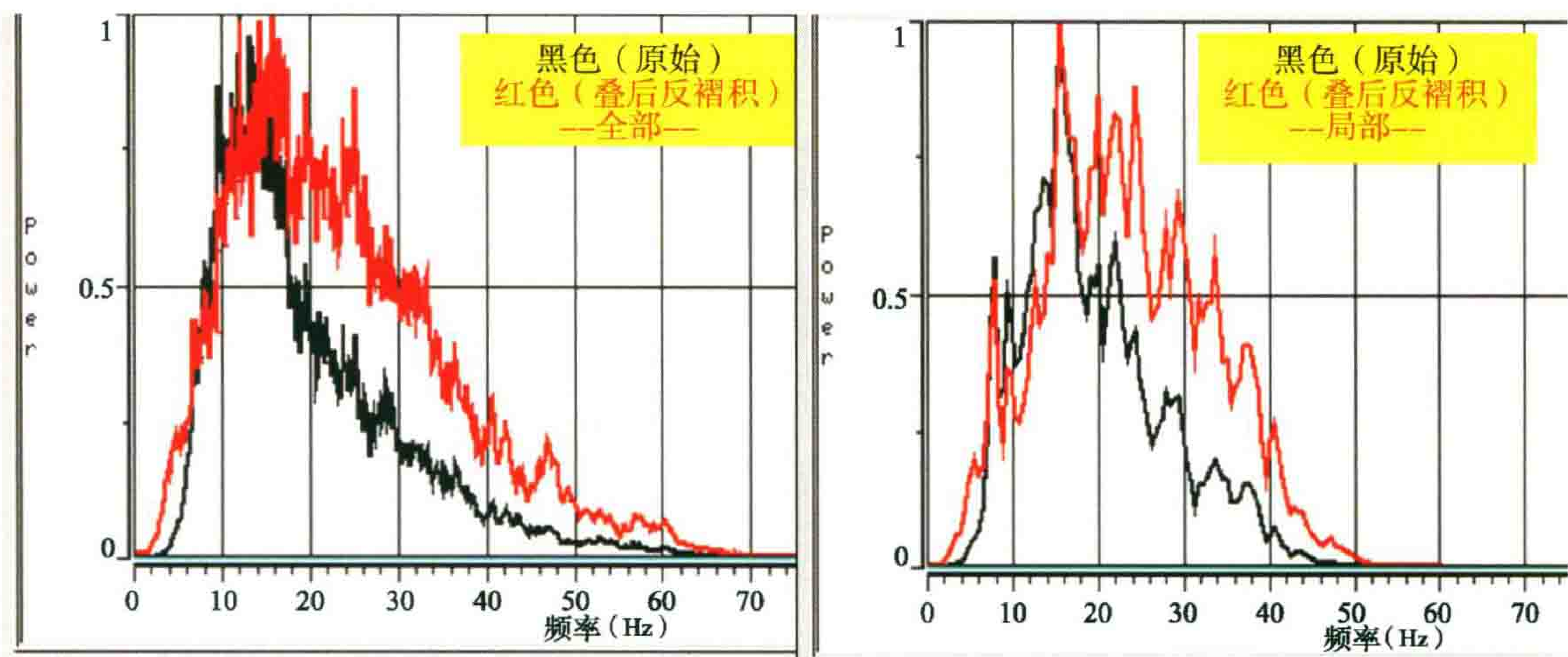


图 25　频谱图（振幅谱）对比（左图为全部，右图为局部）

1. 结论

（1）以上的例子进一步证明了“反褶积并不改变每一个频率成分的信噪比”。所以，反褶积前后的分频扫描图幅十分相似，它们的有效频宽是一样的。但是，反褶积已经改变了“视觉分辨率”，对最终剖面的解释是有利的。

（2）通常的一维振幅谱不能说明剖面质量的好坏。

（3）根据分频扫描所获得的“有效频宽”，才是资料好坏与真假的唯一衡量标准。

（4）偏移（包括叠后与叠前偏移）过程具有一种很强的低通滤波作用，它往往降低了已经获得的“有效频宽”，需要我们用偏后反褶积来加以补救。

2. 今后资料处理及资料解释中需要注意的问题

（1）把分频扫描检验的办法贯彻到采集及处理的全过程。

（2）根据分频扫描的有效频宽来作拓频处理。出站剖面所表达的频带应该与分频扫描的结果一致。

（3）当前各小公司的“拓频处理技术”纷纷占领市场，应该在分频扫描的基础上正确使用。

二、种类繁多的拓频处理，我们要分辨是否是假剖面

（一）高分辨率剖面的最终表达

从频谱的角度来看，剖面的最终表达可以归为以下一些方式。图 26 为我绘出的分频扫描后有效频宽的表达方式。从图中可以看出，A、B、C、D 分别代表了不同的分辨率表达方式。方式 A 为图中的黑色虚线所示（绿粗线上），表现为偏向低频，主要由大地吸收及叠加及偏移所引起的高频损失。方式 B 为图中红色实线所示，为正确表达，频带刚好展宽到分频扫描所得的有效频宽最好。方式 C 为图中黄色虚线所示，有意突出高频，视主频偏高，实际分辨率降低，波形单调，多相位。方式 D 为图中蓝色虚线所示，属于拓频过头，频带虽宽，但出现高频噪声，不利于解释。

我认为高分辨率剖面正确的表达方式应该是图中的 B 实线，即在有效频率范围内，各频率都能获得充分的表达。表达的方式不对，就不能充分利用已经获得的分辨率，或者剖面出现噪声，或者出现假剖面。

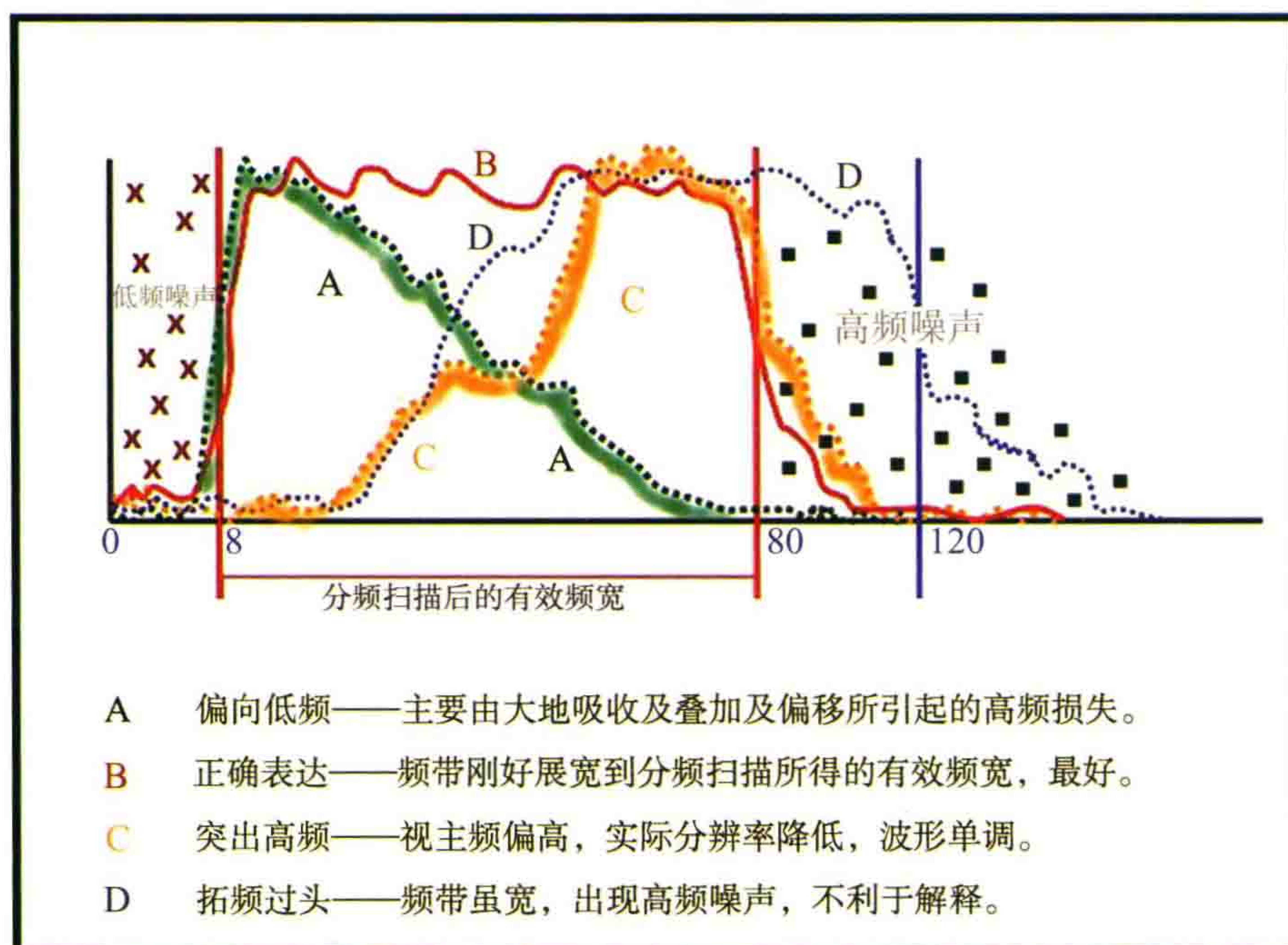


图 26 分频扫描后有效频宽的表达方式

(二) 注意三高处理会造假 拓频处理有讲究

如果高频端信噪比通过处理已经改善，但是叠加或偏移后，没有进一步通过反褶积加以利用，此时拓频处理就很有必要。

注意：

① 滤波及反褶积并不改变每个频率成分的信噪比，揠苗助长没有好处；

② 丢掉低频信号，拔高高频窄带，看起来主频很高，实际上分辨率降低了，在砂泥岩互层的情况下会得到错误的结果。

(三) 种类繁多的拓频处理

多子波分解与重建法 HFE(High Freq. Extention)、小波分析拓频重建法、频谱分解法(Freq. Decomposition)，以及建立在时频分析基础上的调谐能量增强法 TFE(Turning Freq. Enhancement)及点谱法 PSW(Point Spectrum Whitening)等，它们都是利用陷波效应或窄频的滤波效应，突出薄层的响应。对于泥岩为主的地层，它们可以定性地奏效。但是不要忘记，它们是多解的。只有较宽的有效频带子波才能正确地描述地下砂泥岩的分布。

(四) 解释一下“分频扫描”与“有效频宽”

下面看一个分频扫描的例子。

如图 27，通过用较窄的带通滤波器(如此例用带宽为一个倍频程的带通滤波器)从低到高对地震剖面进行滤波，依次把它们排列起来，根据有效信号所形成的同相轴来判断信号的频率范围，对于某目的层，根据能看到同相轴的范围，即可判断出该目的层信号的“有效频宽”或有效频率(即信噪比大于 1 的频率)范围，例如该例 2 s 附近的目的层其“有效频宽”为 10～90 Hz。

图中的 100～200 Hz 滤波档所对应的剖面上看不到有效波的同相轴，说明在这一频段有效信号的信噪比都低于 1。**高频端的主要敌人显然是高频随机干扰，所以在信噪比低于 1 时，看不见反射有效波**。**如**

果不改进信噪比，它是无效频段，拓频把它提起来也没有用。

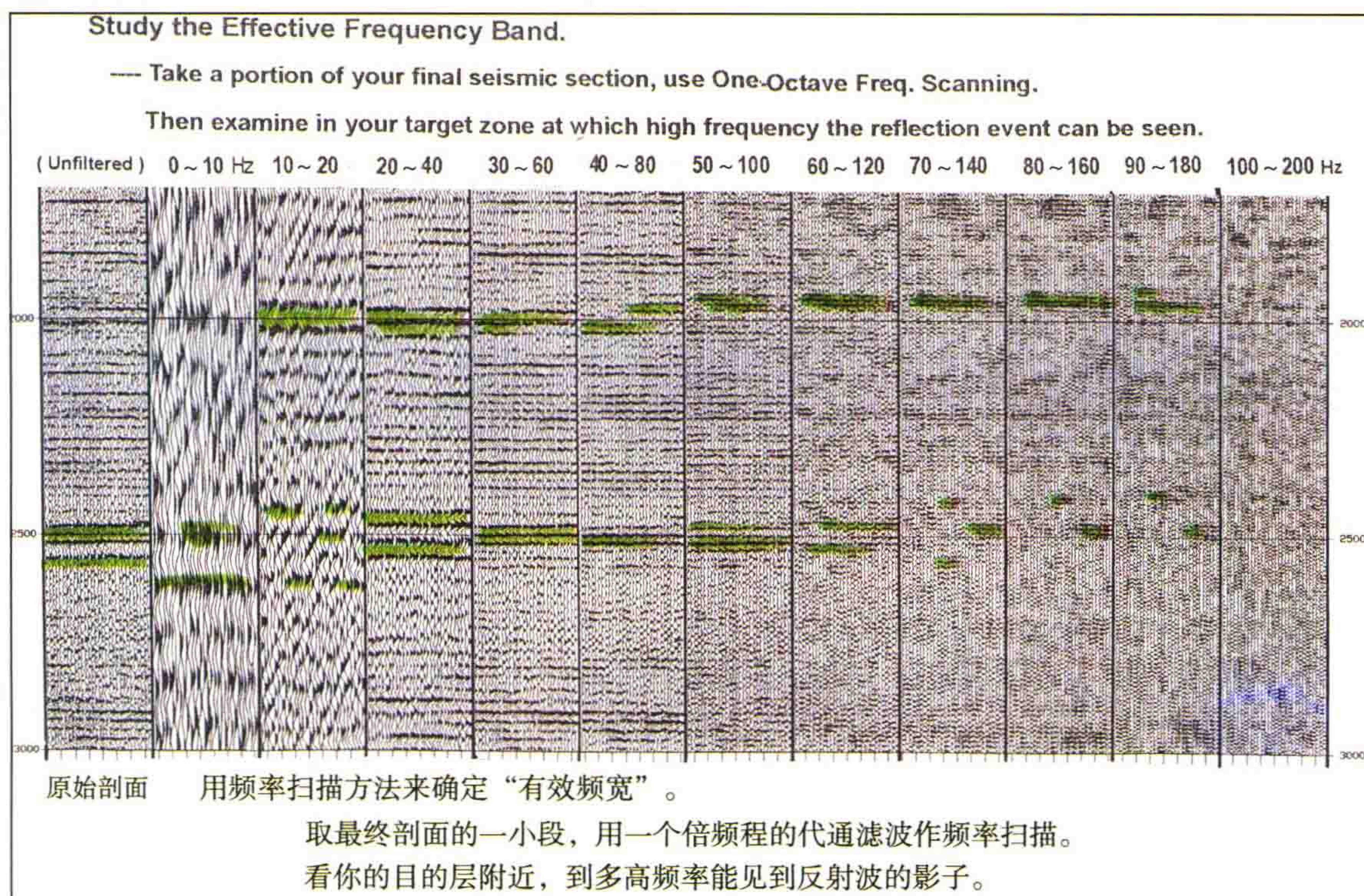


图 27 用分频扫描法来确定“有效频宽”

（五）三高处理的误区

图 28 所示为某公司广告展示的“反射系数无约束反演”效果图，左图为三高处理前，右图为三高处理后。可以看到经过三高处理后，1.5 s 附近地震波主频被提高到 180 Hz，由于大地吸收的作用，在 1.5 s 主频达 180 Hz 是不可能的，这样的拔高处理值得怀疑。

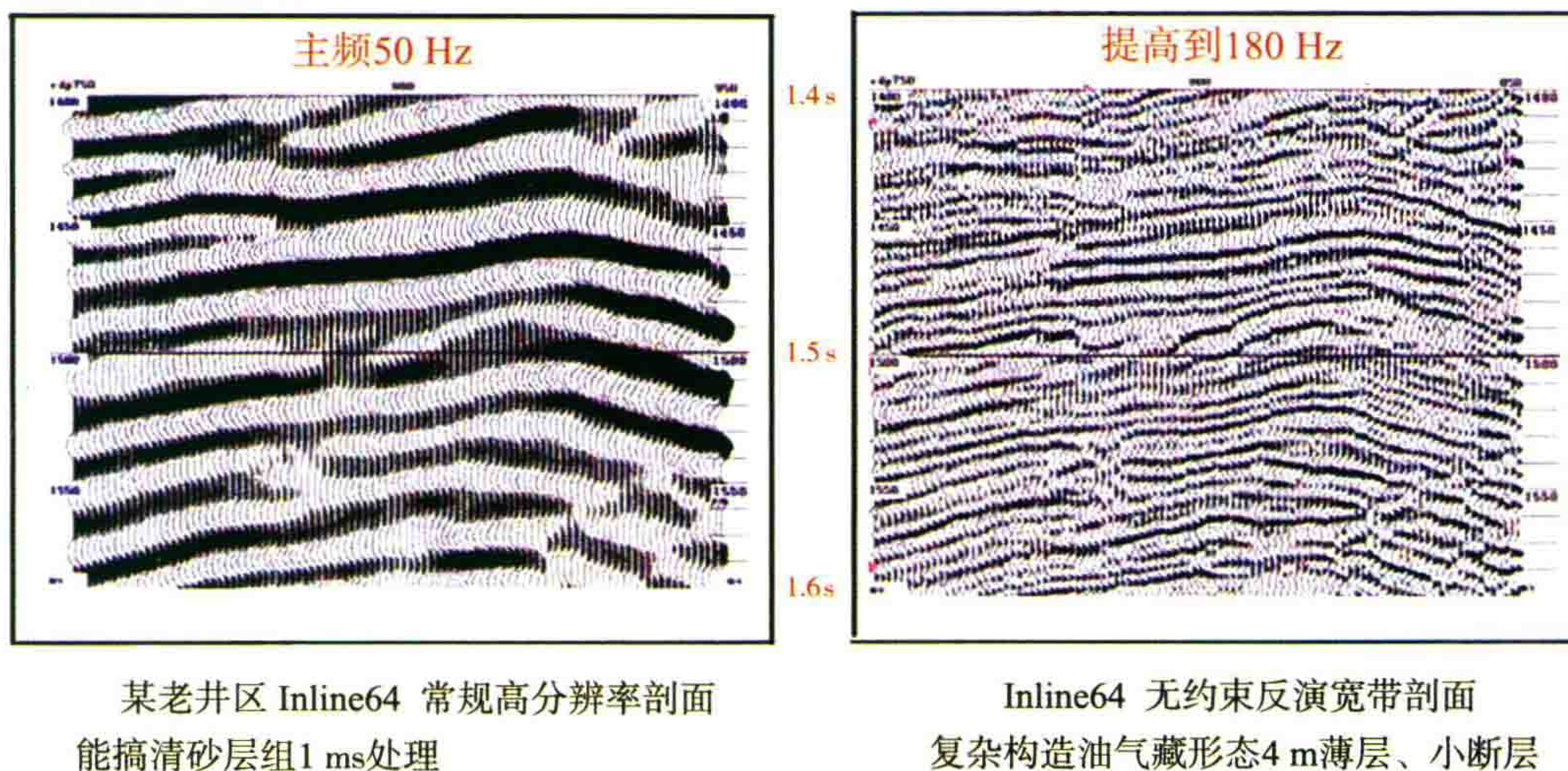


图 28 某公司广告展示的“反射系数无约束反演”效果

图 29 所示为华北平原区新生代盆地的典型吸收衰减图，图 30 为其上半部放大的图。

大地吸收是无情的，高频信号衰减到－60 dB，就很难有救了。

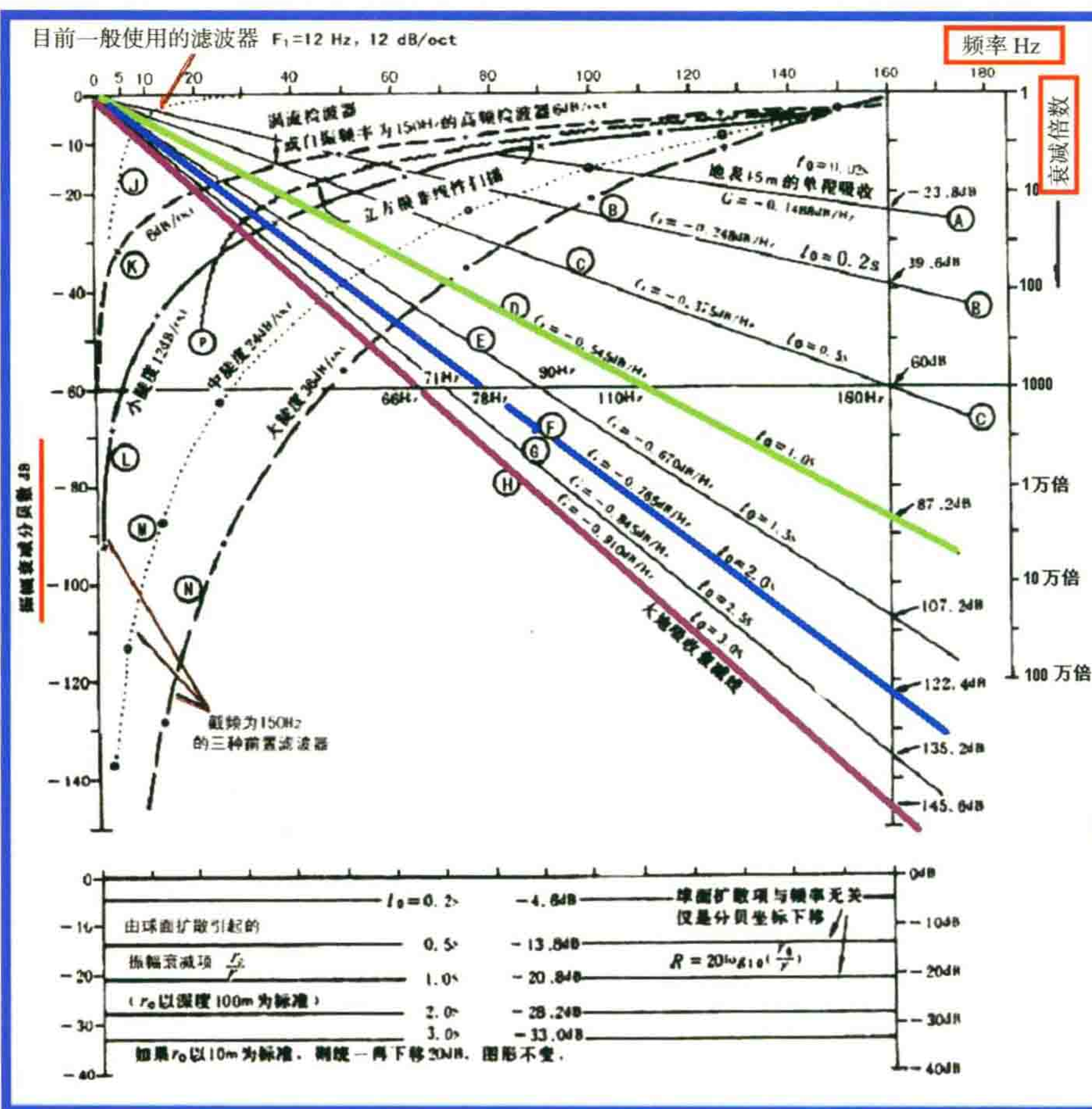


图 29　华北平原区新生代盆地的典型吸收衰减

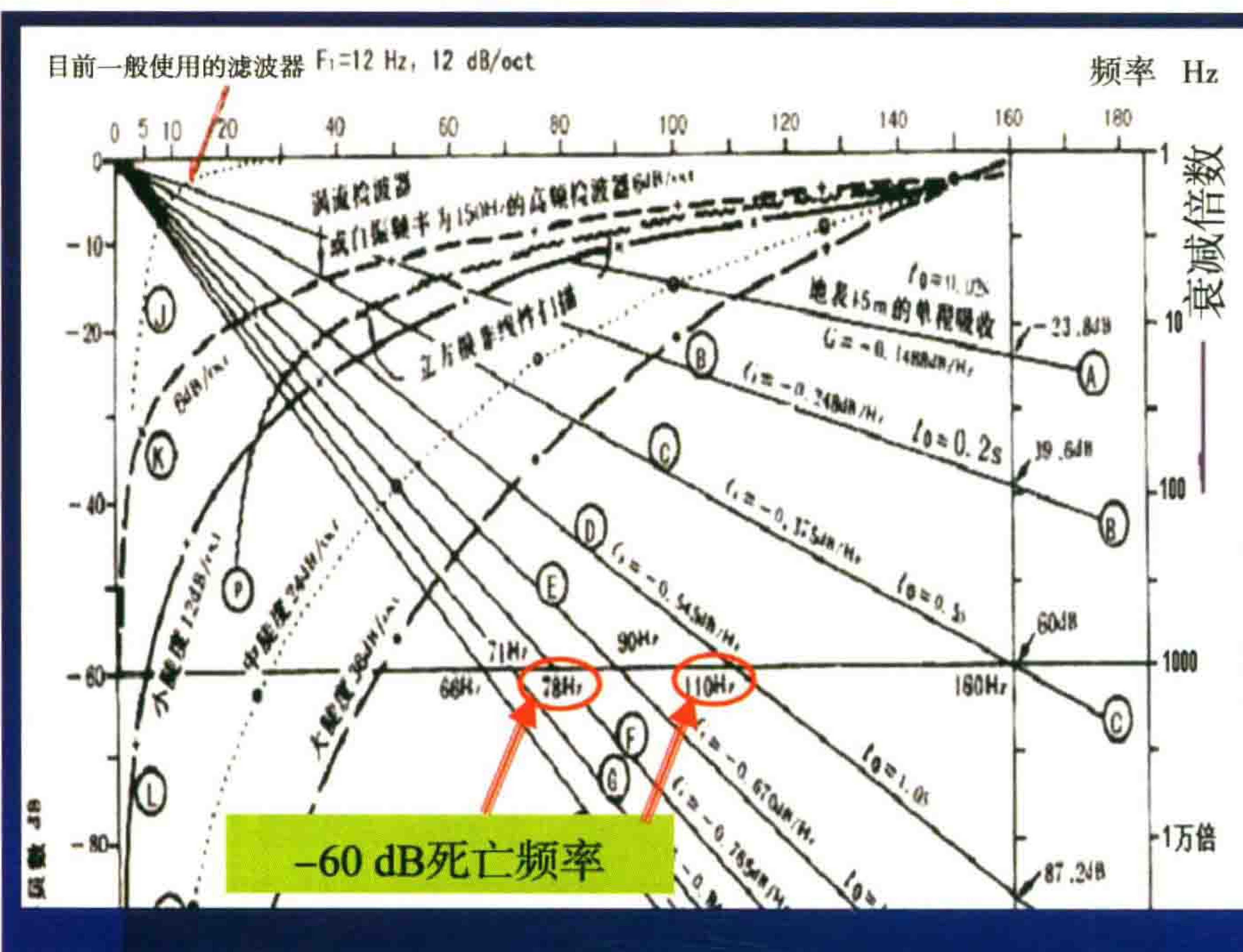


图 30　29 图上半部分放大图

PSW（Point Spectrum Whitening）采用最新时频分析方法，求取地震记录各时间点的频谱（简称点谱），展宽高、低频成份，使处理后的地震资料纵、横向分辨率同时提高，剖面子波接近零相位。

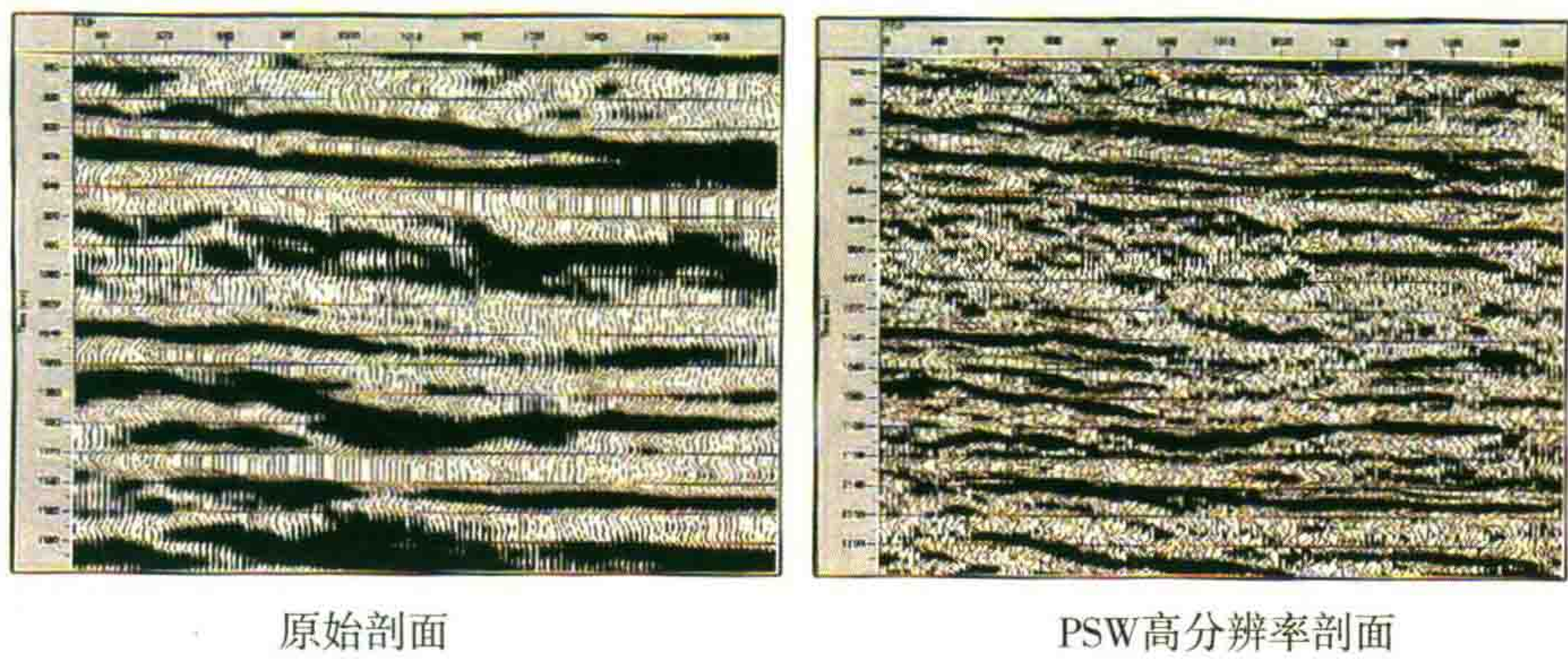


图 31　PSW 方法三高处理前后剖面对比效果

图 31 所展示的为另一种高分辨率处理方法即 PSW 方法三高处理前后的剖面对比效果图。右图所展示的这样精细结构的剖面使人有些怀疑，可能是把高频噪音放大后造成的。

人为拔高高频是需要慎重的。

有意滤去低频，看起来主频高了，实际上分辨率变差了。

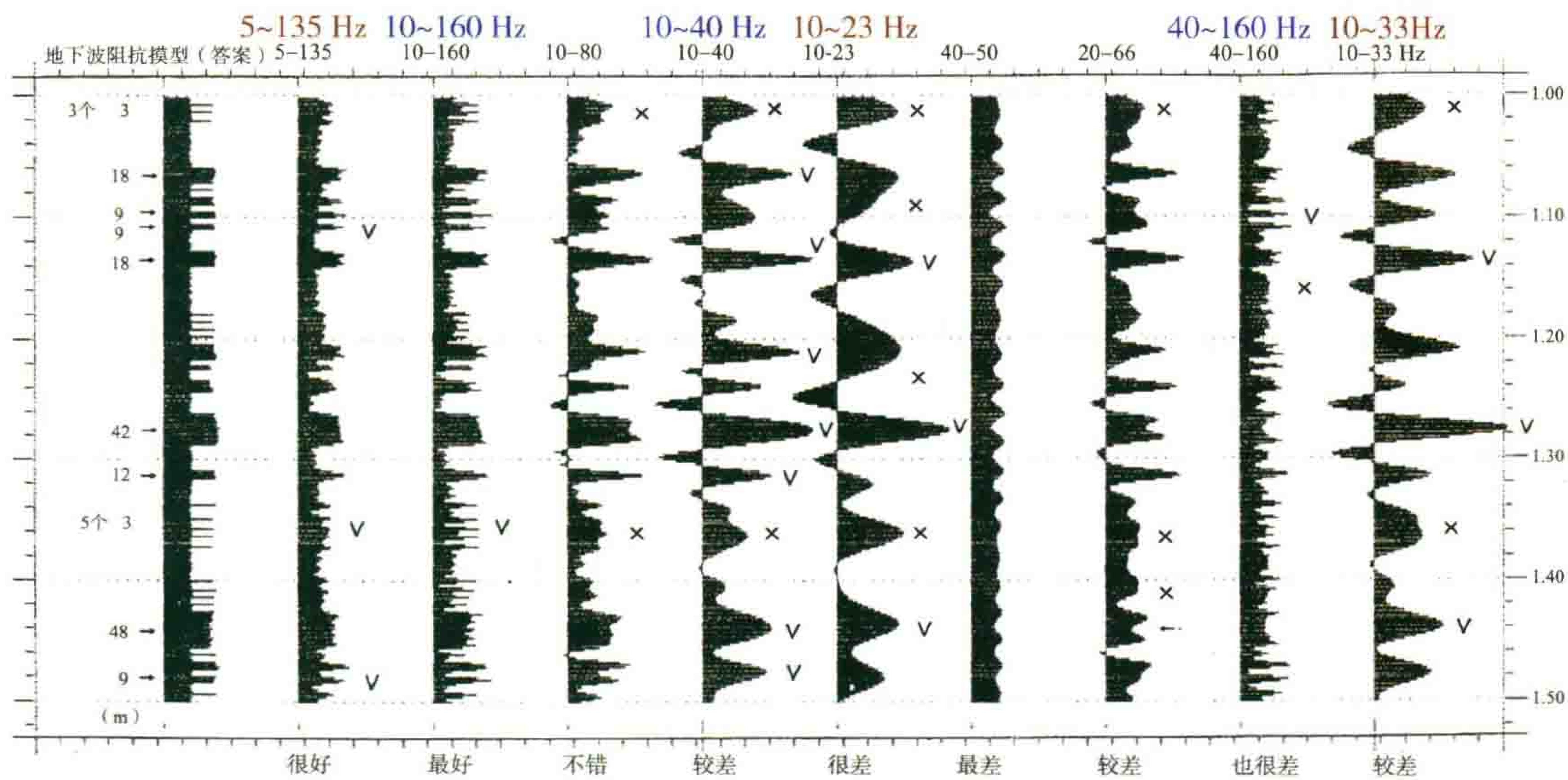


图 32　不同频带对地下砂泥岩互层的反映——相对波阻抗对比

图 32 是我在编著《走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析》时，通过理论模型所做的不同频带对地下砂泥岩互层的反映——相对波阻抗对比图(见《走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析》一书中图 19)。通过该图可看出，宽频 10～160 Hz 反映地下砂泥分布情况为最好，而缺少低频后的 40～160 Hz 频段就比较差了。这说明**丢掉低频信号，拔高高频频带，看起来主频很高，实际上分辨率降低了**，这样在砂泥岩互层的情况下会得到错误的结果。

我在《走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析》一书中讨论过“拓频问题”，还举了假分辨率的例子(图 33、图 34)。

作频域拓宽[37]，即在低频端采用自回归法做预测，在高频端采用最小熵法向高处拓宽。图107是一个理论模型的试验。它的确只需要一个窄频带就可以恢复整个频带，从而恢复波阻抗的所有频段。但实际上这种办法只是在不存在噪音的条件下才是对的。每一个噪音（哪怕是一个很小的抖动）都是贡献、分布在全频谱上的，所以以上所说的频域拓宽技术肯定把噪音同时也精确无误地拓宽出来。将来使用小波分析理论可以使频谱分析局部化，但是采用单道去作运算肯定也还是不成的，因为正如我前面说过的："信号与噪音不能在单道上定义"。

不从根本上去改变高频段（及低频段）的信噪比谱，只想通过数学的方法去作拓宽反演，这看样子是没有什么出路的。

当然，如果这个"巧妇"的确很巧，她把手中仅有的混有沙子的米，通过淘去沙子，再做成饭，那是很不错的。这也就是要求这种反演方法具有不让噪音参与反演的功能。这样的例子我后面还将要提到。

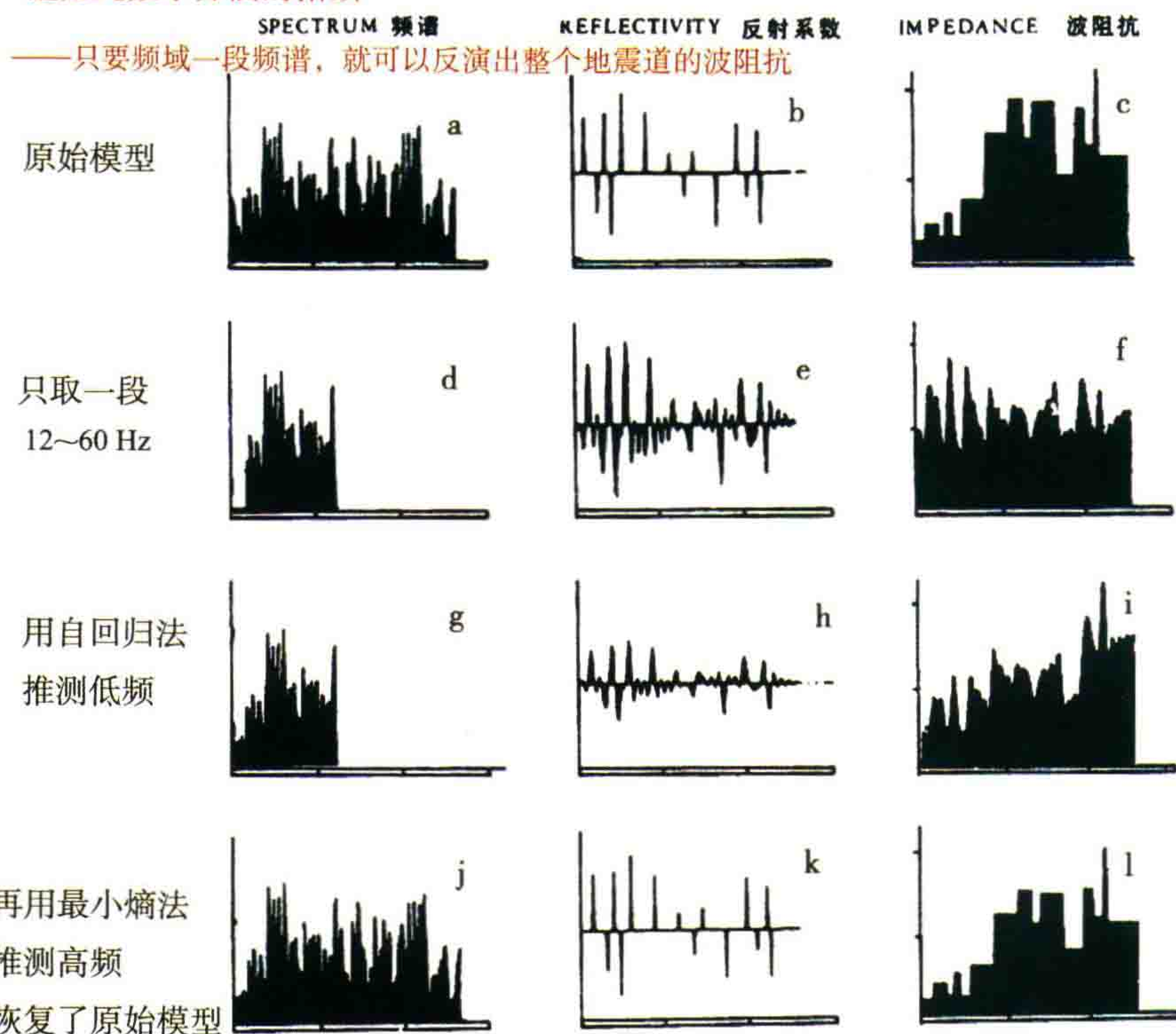
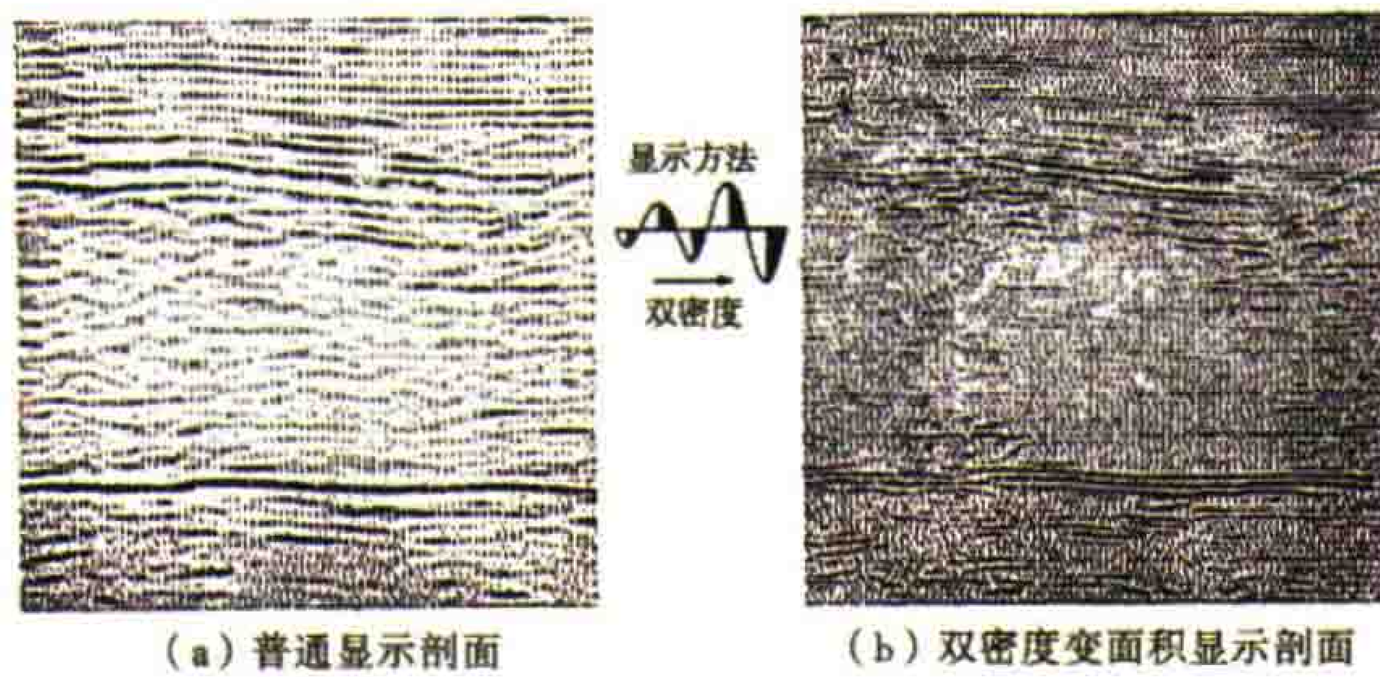


图 33 《走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析》中讨论拓频问题

用）。双密度显示剖面猛一看似乎频率提高了一倍，其实，这仅仅是不同的显示方法而已，分辨率在这里既没有提高，也没有降低，这种“假分辨率”倒是没有什么坏处，可能还有些好处

走向精确勘探的道路　　假分辨率



（a）普通显示剖面　（b）双密度变面积显示剖面

图 112　常规变面积剖面与双密度剖面显示法的对比

Double density display method. You may see the trough at the same time

（3）谱移展法：这是一种错误的方法。该方法在地震剖面上寻找同相轴，每找到一根同相轴就记住它的时间倾角，同时对它开一个小时窗作频谱分析，找到它的主频（例如为30Hz），于是就设计一个振幅谱为三角形的、主频提高一倍（即60Hz）的零相位子波，放回到刚才找到同相轴的地方去，并且按照该同相轴的时间倾角，传送波形到相邻道上去，这便是谱移展法的基本做法。

我认为该方法差不多等于用计算机人为地去将主频提高一倍，也就是看到一个轴就让计算机制造两根轴，其后果是“打乱”了反射系数序列的本来面目。

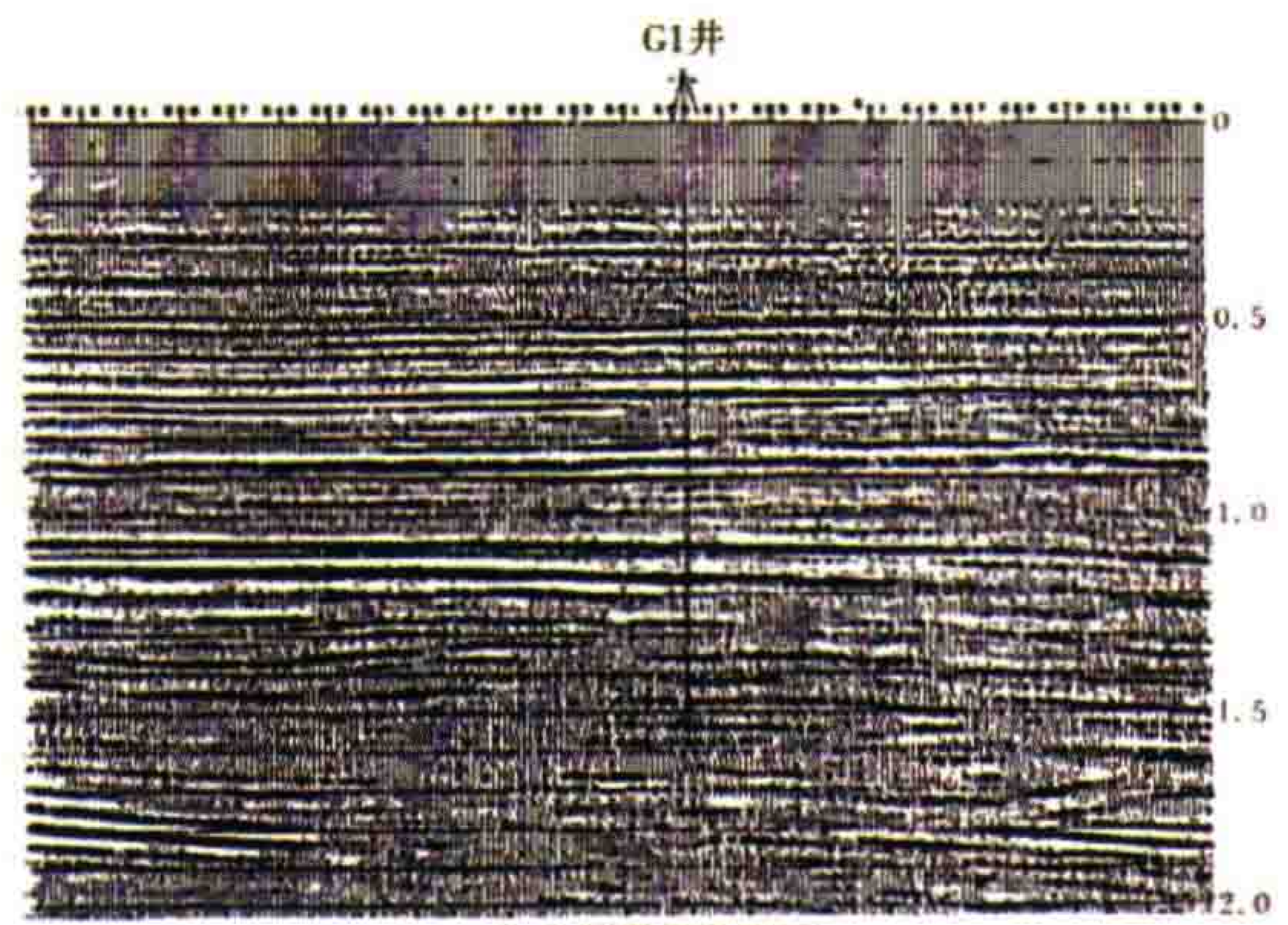
因而，这种方法是不值得提倡的，分辨率是不能人为地制造的！

图 113 是谱移展法的一个实例，可以看到连续相位很多，其实不是真的分辨率的提高。

（4）最后提出一种我们有时有意无意要犯的毛病，就是所谓“丢失低频的高频剖面”，有意丢失的情况是因为有的人不了解分辨率的基本概念，以为主频愈高分辨率就愈高，因此有意将 30Hz 以下的成分滤掉，只剩下 30Hz 以上的信息，如我前面的理论记录图 88⑦ 所示，实际上子波丢失低频后频带变窄，分辨率反而降低了，其后果是连续相位增多，分辨率变差。据说有人用这种剖面去追踪砂层，还得到很好的地质效果，不知道是否真是如此。

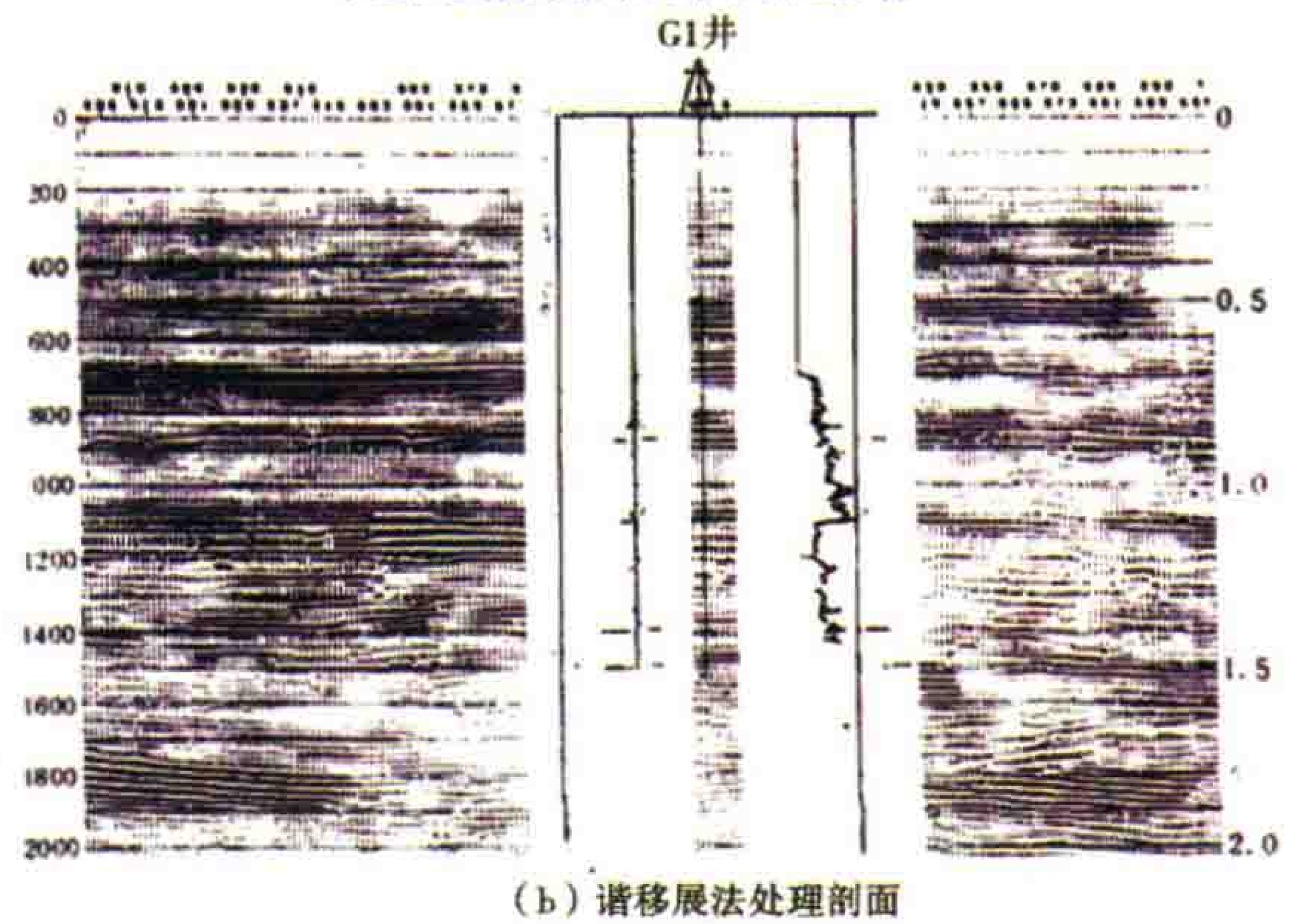
还有一种情况是无意的，例如为了克服海上的强多次波，而且想研究 AVO 现象，要在水平叠加之前就把多次波压下去，于是只有采用叠前 f-k 滤波。大家知道，在 f-k 域中，多次波与有效波象两片向上张开的叶子，其下面在（低波数、低频率）原点附近是互相重叠的。如果你想把多次波彻底滤掉，就必然伤害反射有效波，而伤害的部分是其低频信息。

因此，搞资料处理的人要注意经常在流程中检查有效波的实际频带情况，不要忘记努力争取一个最大的有效频宽。



（a）原始叠偏剖面

走向精确勘探的道路



（b）谱移展法处理剖面

图 34　《走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析》中所举假分辨率例子

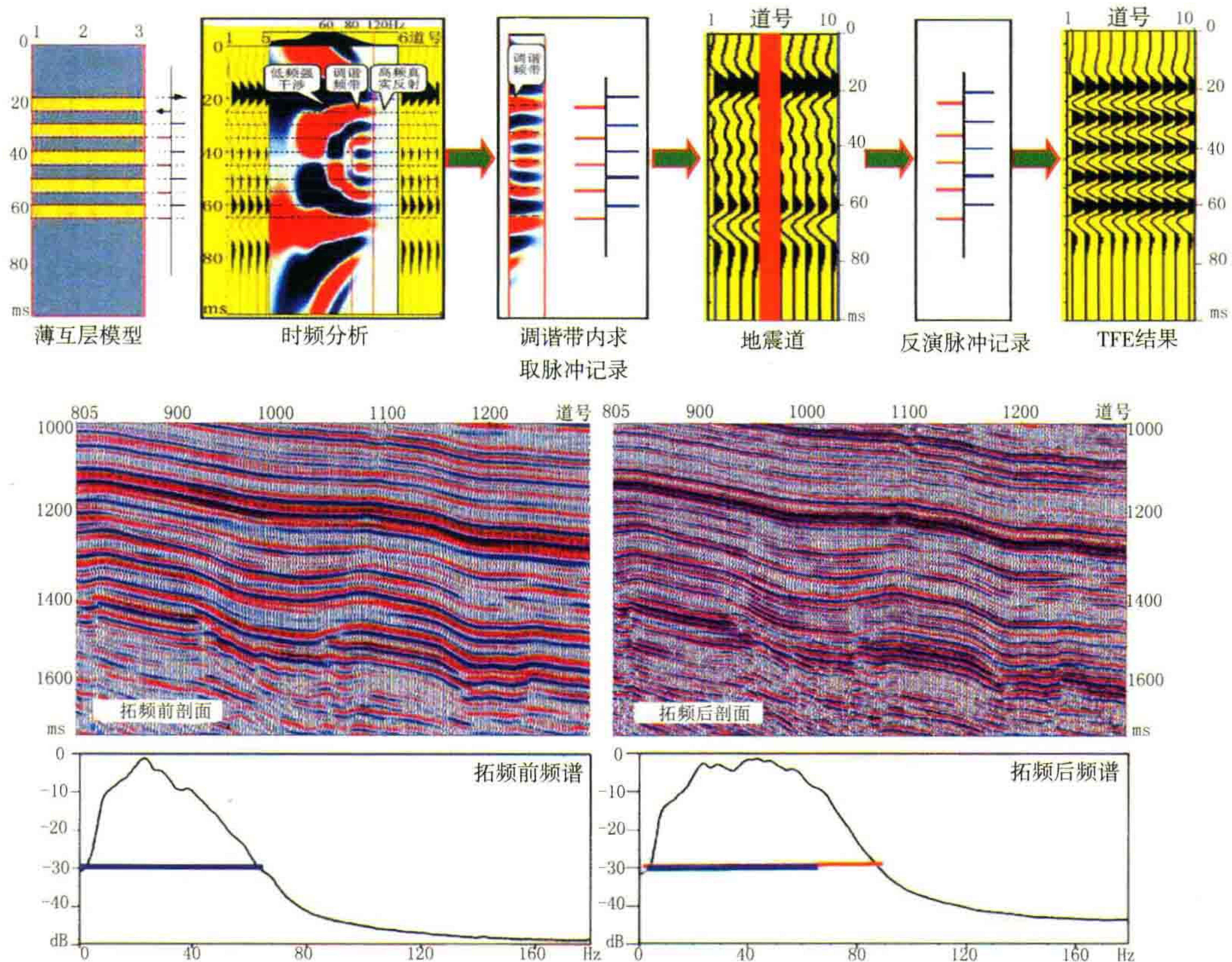


图 35　调谐能量增强法

图 35 所示的 TFE 方法（调谐能量增强法）如做得得当，就起到拓频的好作用，用不好也会有问题，原因如下。

（1）拓频处理如果用分频处理压噪，再重建合成的方法是会出错的。

（2）高频端的随机噪声去噪后会留下“假信号”。

（3）只有高频段的信噪比得到真正的改善了，才是真的分辨率提高了。

图 36 所示为另一个拓频技术 HFE 法的例子。在拓频后所出现的东倒西歪的短同相轴，我不信它是真实的地下结构，不是前积现象，最可能是高频去噪后留下的假信号。

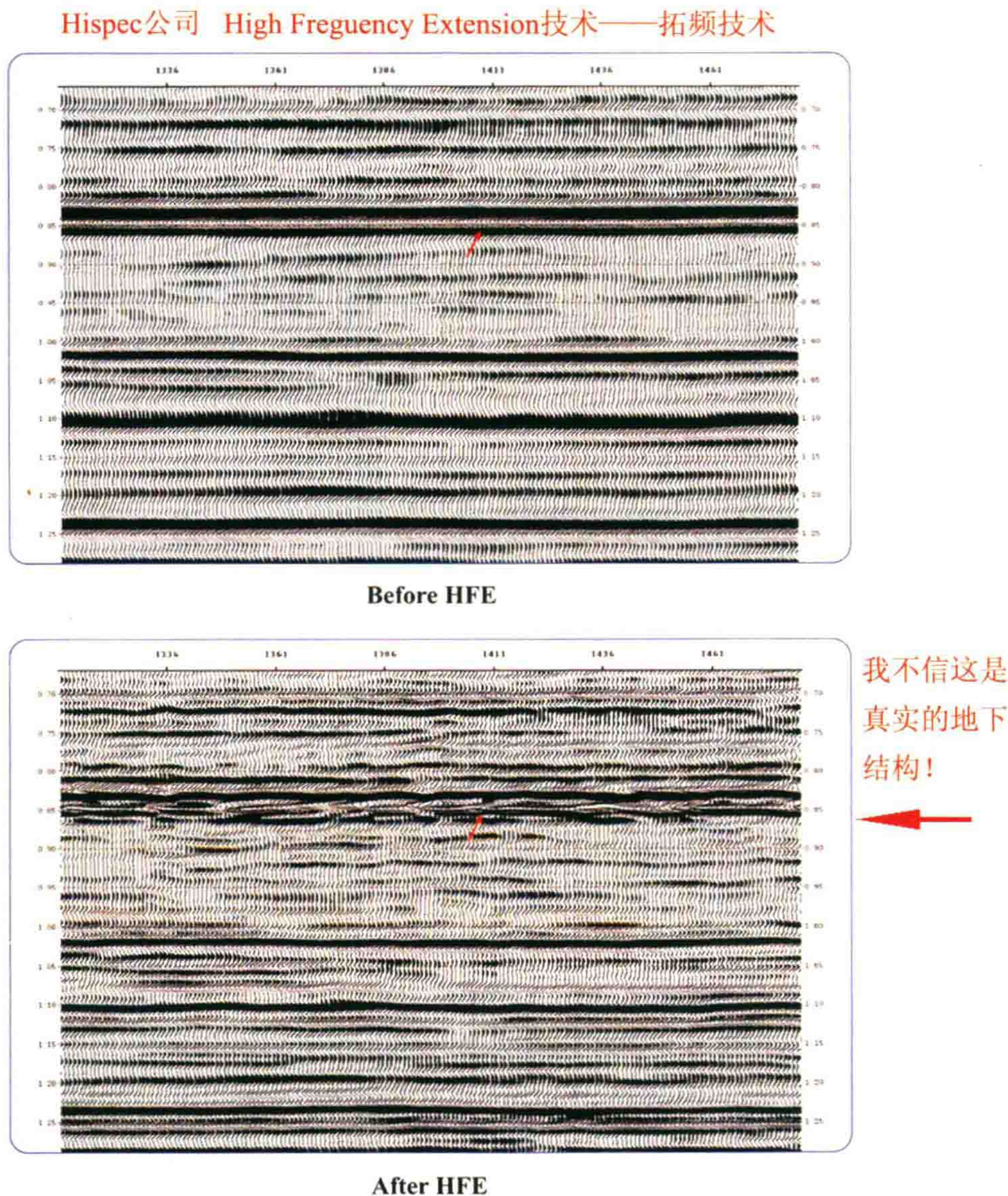


图 36　拓频技术 HFE 的例子

注意，分频处理中的噪声会变成“假信号”！

下面我通过理论模型来说明。

我把纯随机噪声作为原始输入，来研究纯随机噪声在压噪后的波形及振幅变化情况。

图 37 为纯随机噪声数据的剖面，它是通过计算机产生的随机数，再褶积一个子波，形成变振幅的随机噪声模型。随机噪声的振幅绝对平均值为 0.4367。为防止边缘效应，仅显示了中间 60 道。

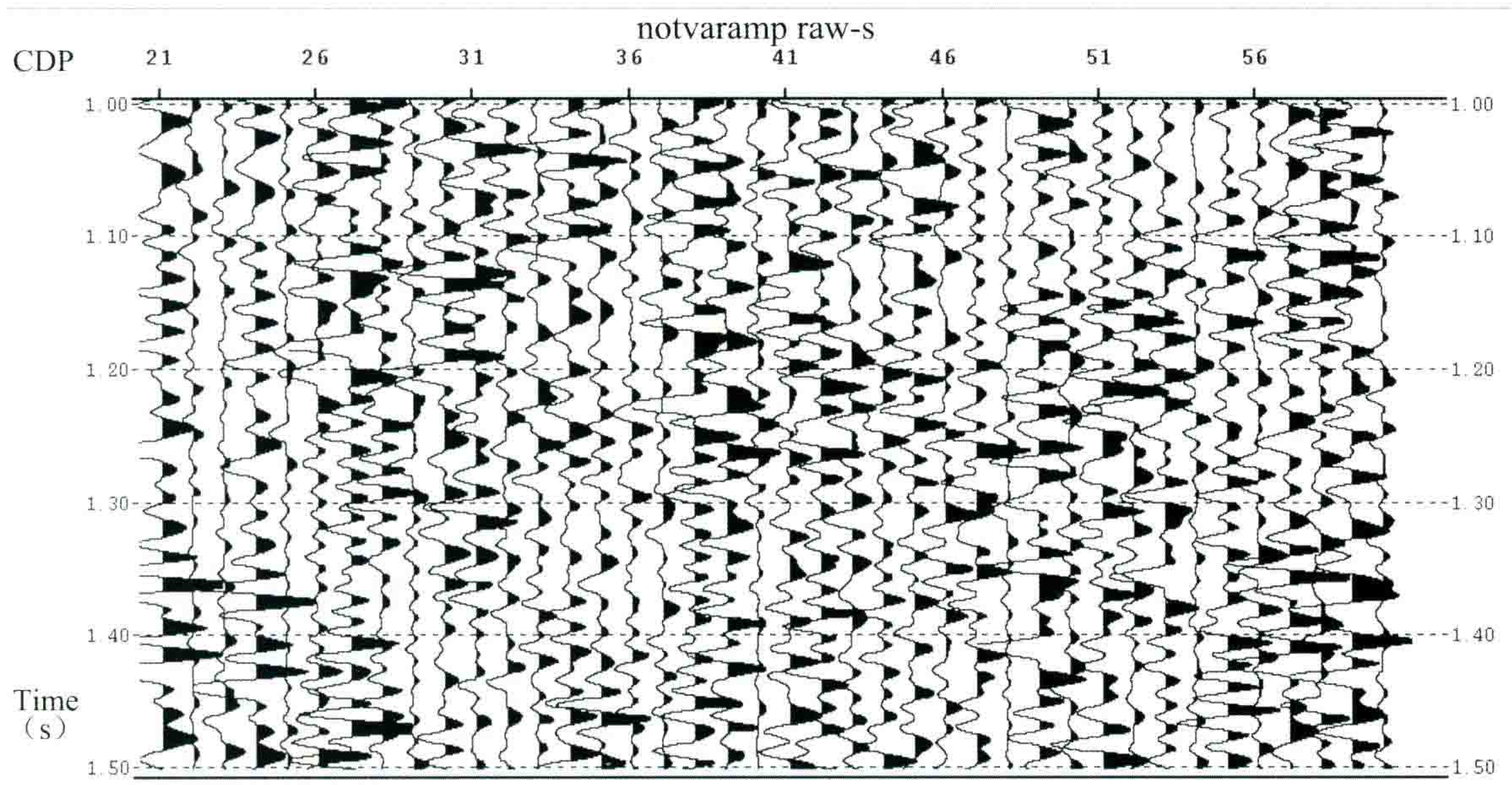


图 37 原始纯随机噪声数据剖面

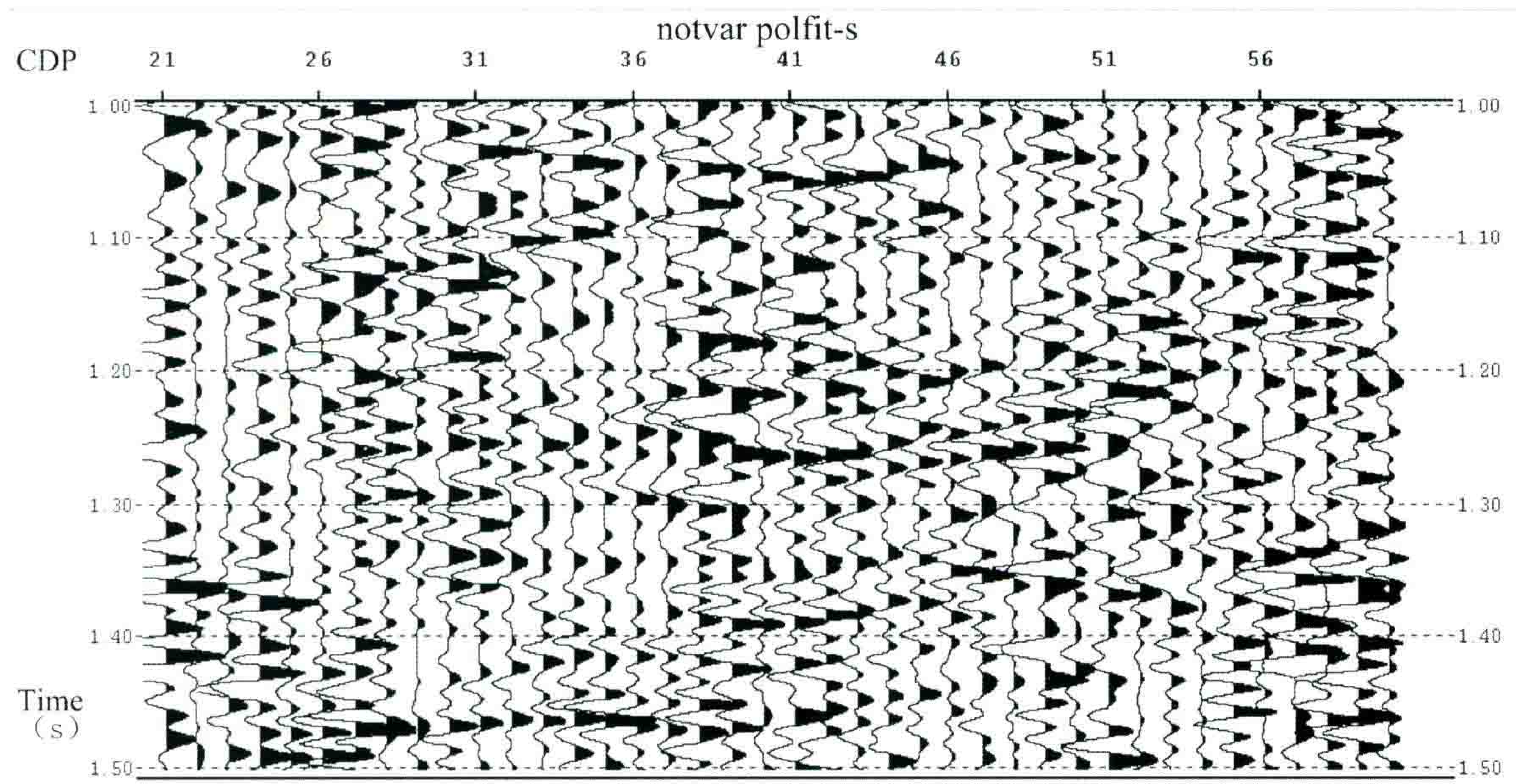


图 38 对原始数据进行多项式拟合去噪(POLFIT)后的剖面

图 38 为对随机噪声模型数据通过应用 GRISYS 系统的 POLFIT 模块，进行多项式拟合去噪后的剖面。原始噪声振幅绝对平均值为 0.4367。通过该步压噪后绝对平均值为 0.3523，平均振幅小 20%。

图 39 所示为对通过 GRISYS 系统的 POLFIT 模块进行多项式拟合去噪后的数据，再利用 Focus 系统的 COHERE(即倾角滤波)模块进行处理，参数为−5～+5。经过该步压噪后绝对平均值变为 0.3078，平均振幅比原始小 30%。

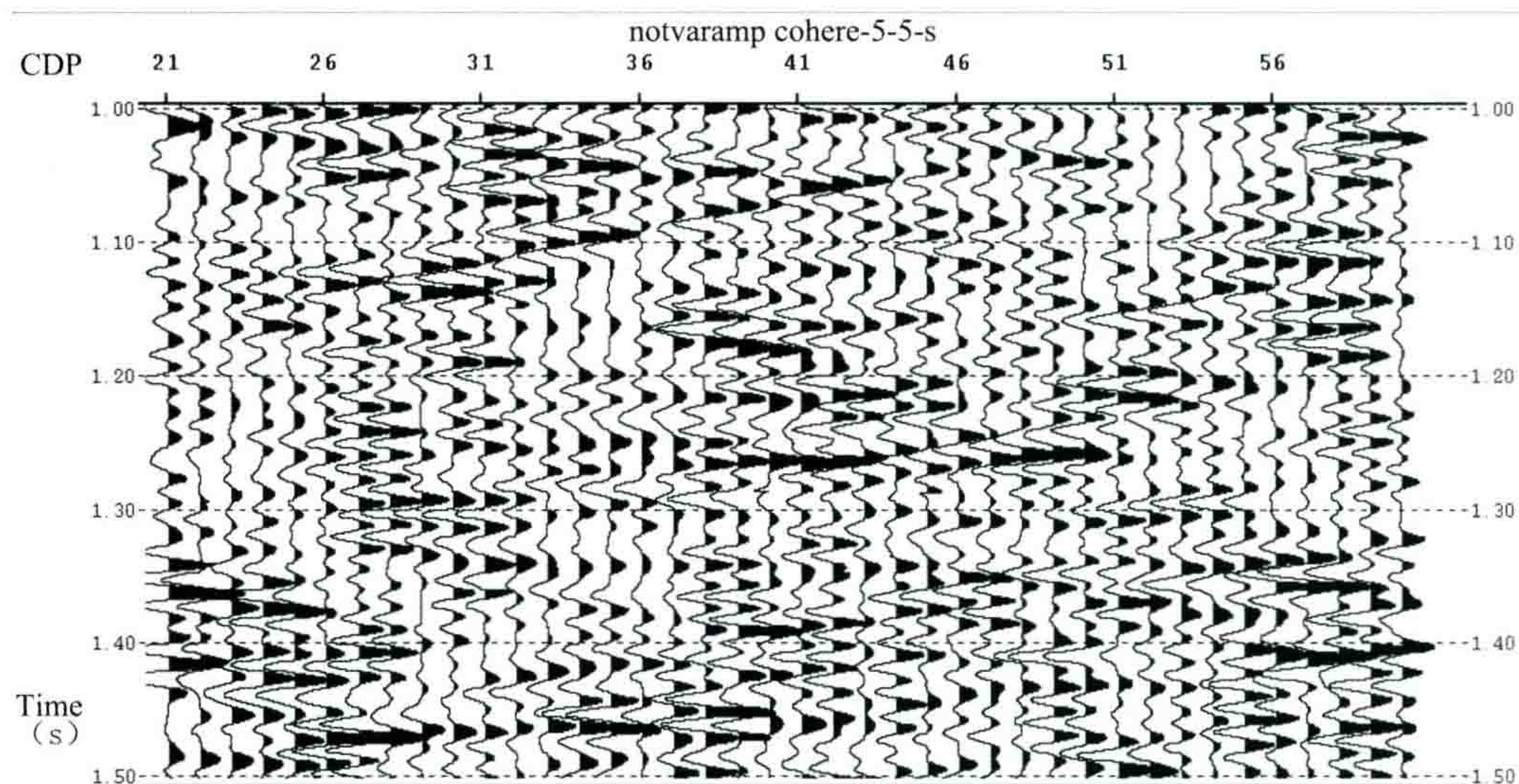


图 39　再应用 COHERE(即倾角滤波)处理后的剖面

图 40 所示为再应用 ProMAX 的 eigenstk(本征叠加)模块 5 道加权处理，原始噪声振幅绝对平均值 0.4367，压噪后绝对平均值 0.4460，平均振幅大 2%，本征叠加压噪的结果基本是按输出振幅归一化的。

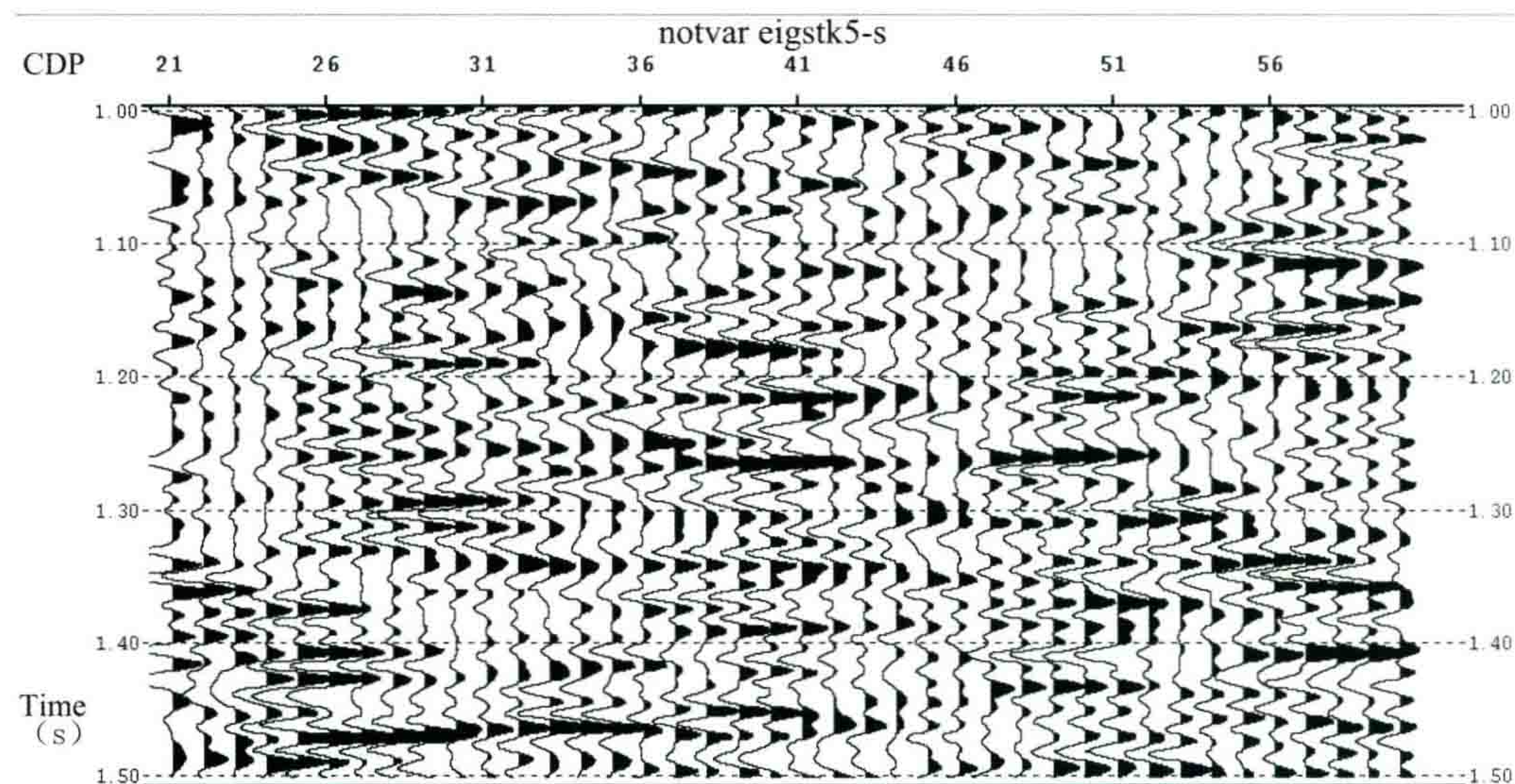


图 40　再应用 ProMAX 的 eigenstk(本征叠加)模块处理后的剖面

通过以上所示的各步压噪处理后的试验剖面上可以看到，对于随机干扰模型经过持续的压噪后，剖面上出现了一些“同相轴”，这些“同相轴”看似是信号，但它不是“信号”，是假信号。

我用随机干扰模型试验证明了在随机噪声占据优势的剖面中，用不同的去噪手段可以得到不同样子的“假信号”。想要东倾有东倾，想要西倾有西倾。

分频去噪再合成的拓频剖面，在“有效频带”以上的随机噪声就可能出现东倒西歪的高频假信号。

(六) 真假分辨率的辨别方法

如果拓频过头，同时又加了去噪，那么经过作分频扫描，高频成分的产状及形态与低频的完全不协调。这就是“假分辨率”的证明。

当拓频过头，但未加去噪，那么分频扫描后，高频部分主要为麻麻点的高频干扰。

三、覆盖次数越来越多，道数多了炮检距越来越大，主频更偏低

（一）造成地震剖面主频愈来愈低的几个因素

（1）地震采集接收道数愈来愈多。

（2）覆盖次数愈来愈高。

（3）炮检距愈来愈大，非纵距愈来愈大，更是直接导致主频偏低。

（4）地下水位愈来愈深，低降速带增加十多米。

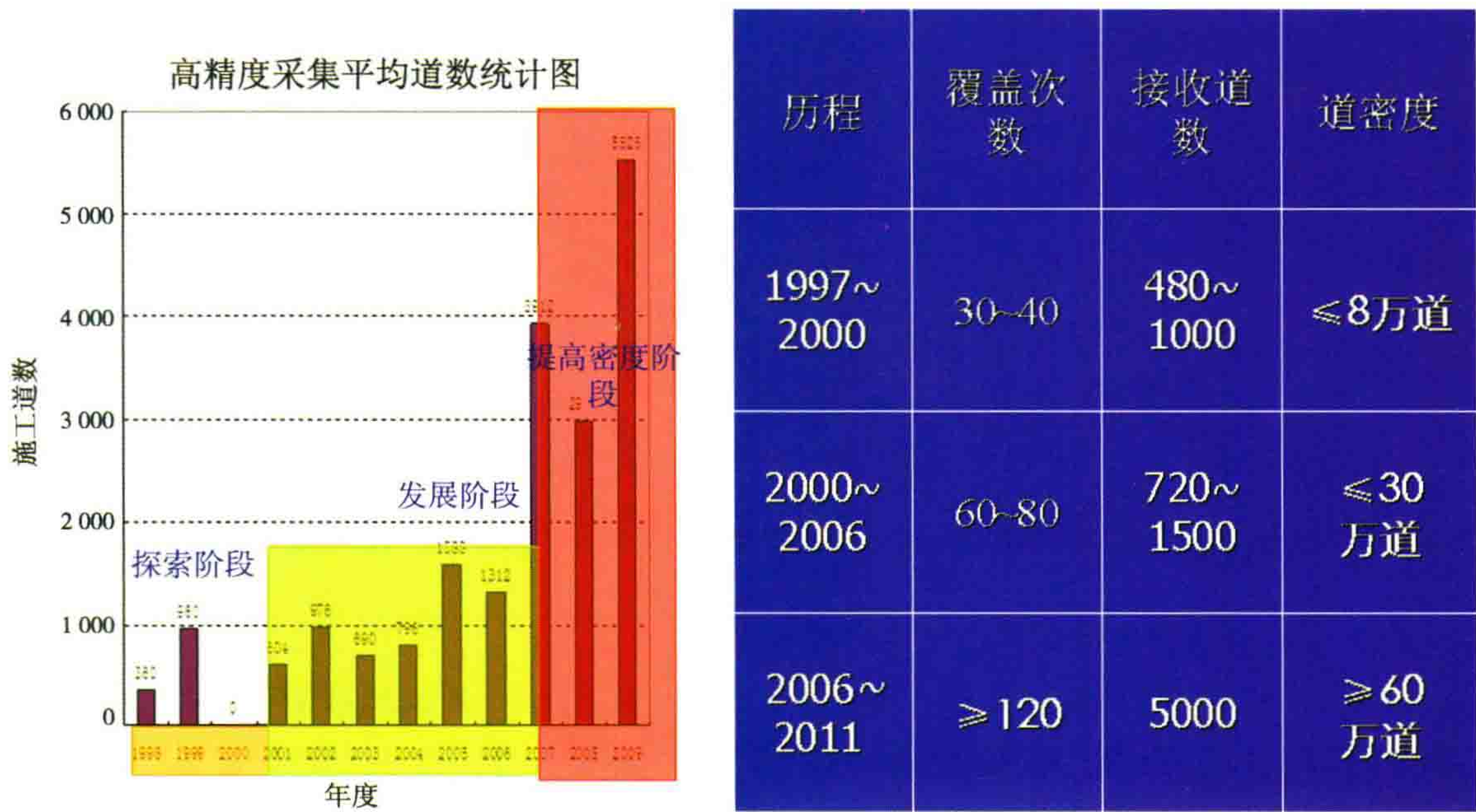
（5）城市扩展，工业发展使地震施工条件愈来愈复杂。

（6）可控震源的采用使激发频谱变窄，不如井炮。

（7）三维资料的大联片也使频带进一步变窄。

（8）资料处理中的有些复杂模块也会导致高频损失。

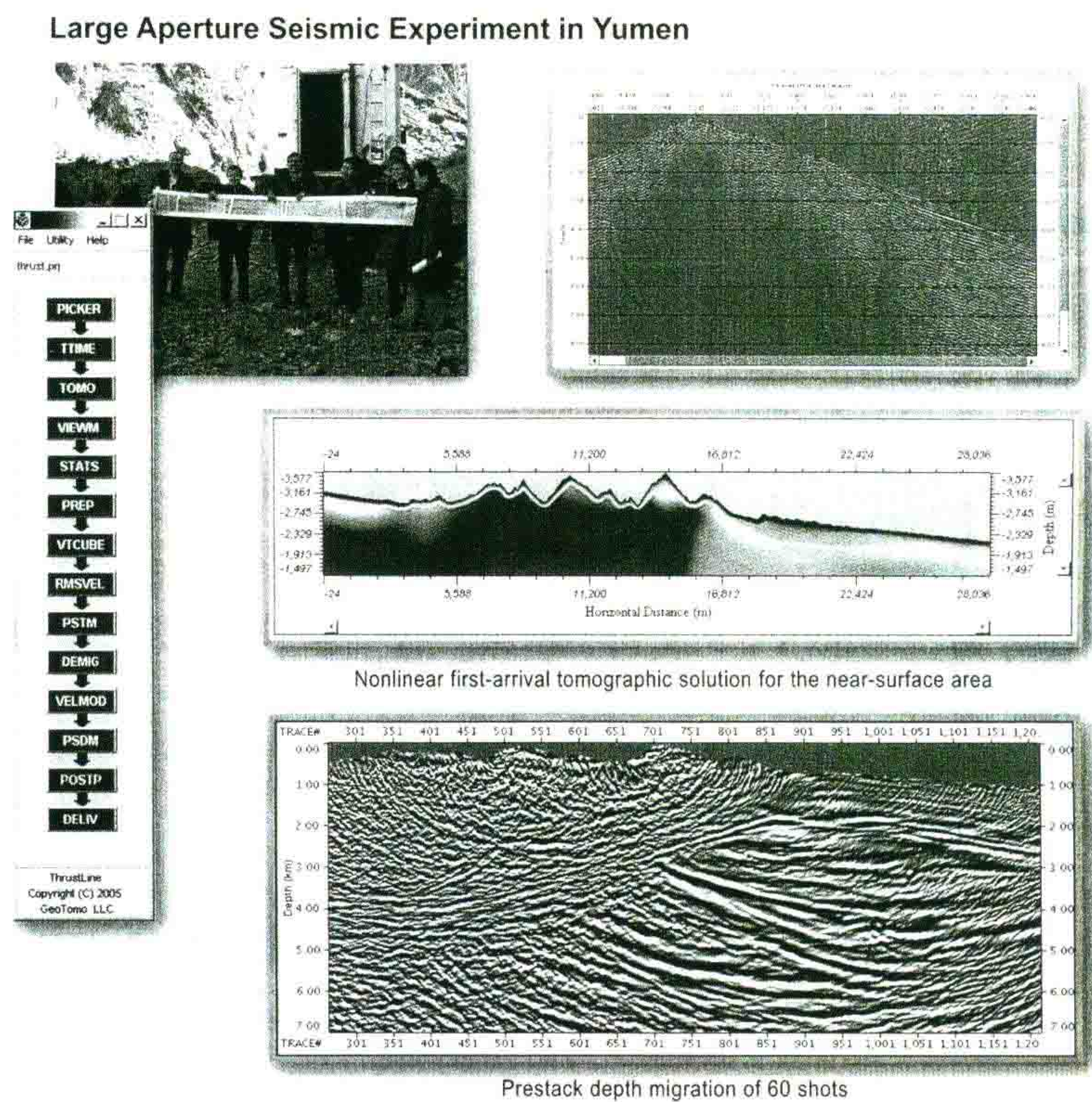
图41所示的某探区的高密度高覆盖的历年统计数据。



历程	覆盖次数	接收道数	道密度
1997~2000	30~40	480~1000	≤8万道
2000~2006	60~80	720~1500	≤30万道
2006~2011	≥120	5000	≥60万道

图41　胜利探区各年度高精度采集平均道数统计图

伊尔马兹在玉门窟窿山做了超长排列的试验（图42），排列长度28 km，得到的剖面很糟糕。



ThrustLine is designed for imaging both complex near-surface and subsurface structures. Kulong Mountain near Yumen in China is one of the difficult seismic exploration areas like that. **ThrustLine** proves to be a powerful tool for dealing with seismic imaging problems in this area.

图 42　玉门窟窿山超长排列试验

（二）大排列带来的新问题

1. VTI 介质的视各向异性动校正问题

图 43 所示为大排列资料常规动校正与各向异性动校正的结果对比，对于速度递增的层状介质的 CMP 道集动校后远道向上翘，校不直，必须要用 VTI 视各向异性动校正。但是用 VTI 视各向异性动校正后，频率明显降低。

有必要使用很大的炮检距吗？

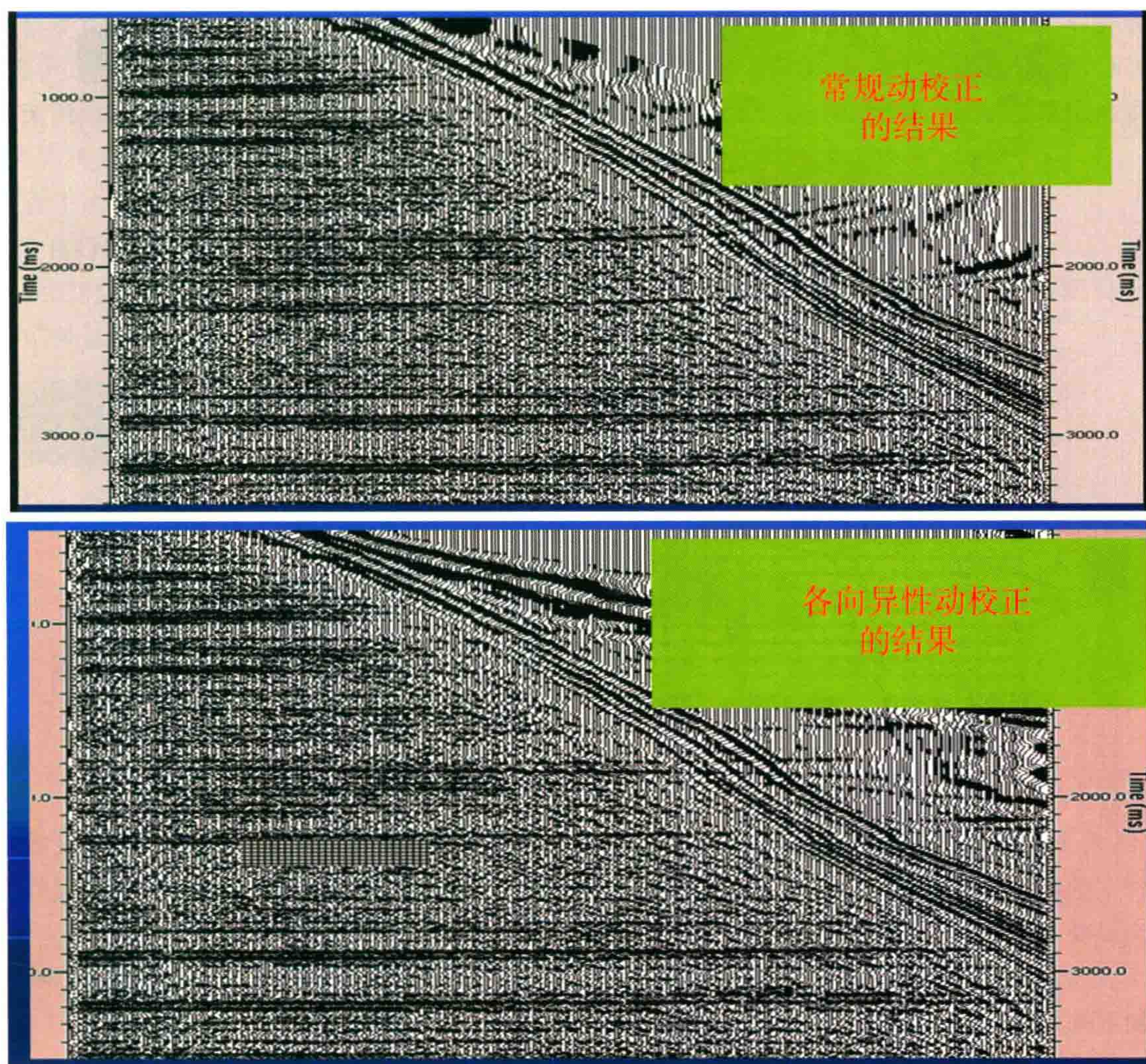


图 43　大排列常规动校正与各向异性动校正结果对比

2. 由大排列层间干涉所引起的假 AVO 现象

我发现由大排列层间干涉所引起的假 AVO 现象是 VTI 介质做动校正的克星。

如果为了研究 AVO 现象，不必使用各向异性动校正。只有近道完全被噪声所淹没，中炮检距也没有反射有效波。只有远道才有信息时，才有必要做。

且看下面论证由大排列层间干涉所引起的假 AVO 现象。

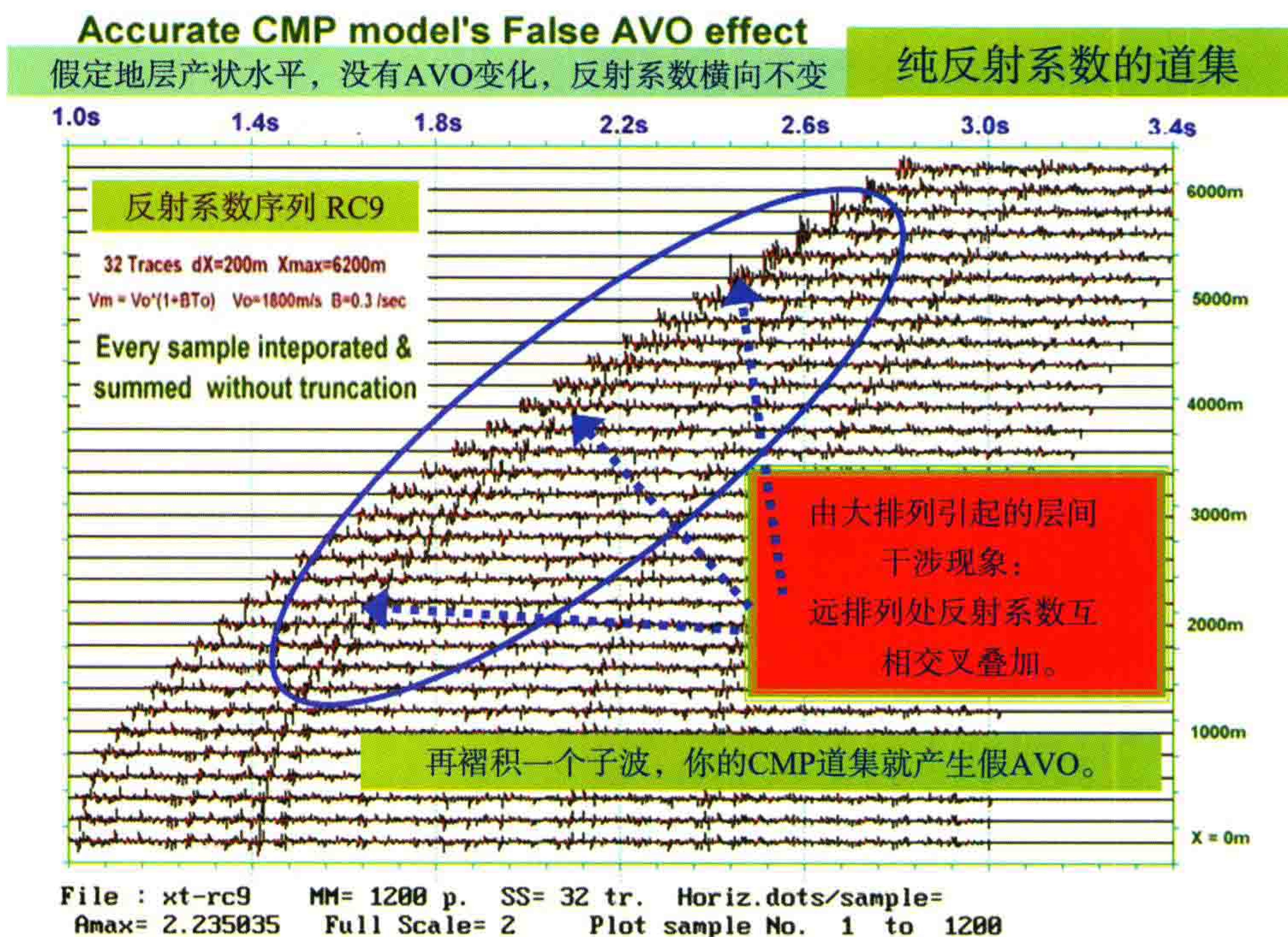


图 44 纯反射系数道集记录

图 44 所示为纯反射系数道集记录，它是在假设地层产状是水平的，没有 AVO 变化，反射系数横向不变的条件下的纯反射系数道集记录。通过它可以看到由大排列引起的层间干涉现象，在远排列处反射系数互相交叉叠加。

为了说明由层间干涉所引起的假 AVO 现象，我们首先得编制高精度的没有 AVO 现象的 CMP 道集，还要编制有高保真的动校正计算程序。

(1) 自行编制高精度的没有 AVO 现象的 CMP 道集的程序 MODEWAVE。

图 45 所示即为该程序产生的没有 AVO 现象的理论 CMP 道集。

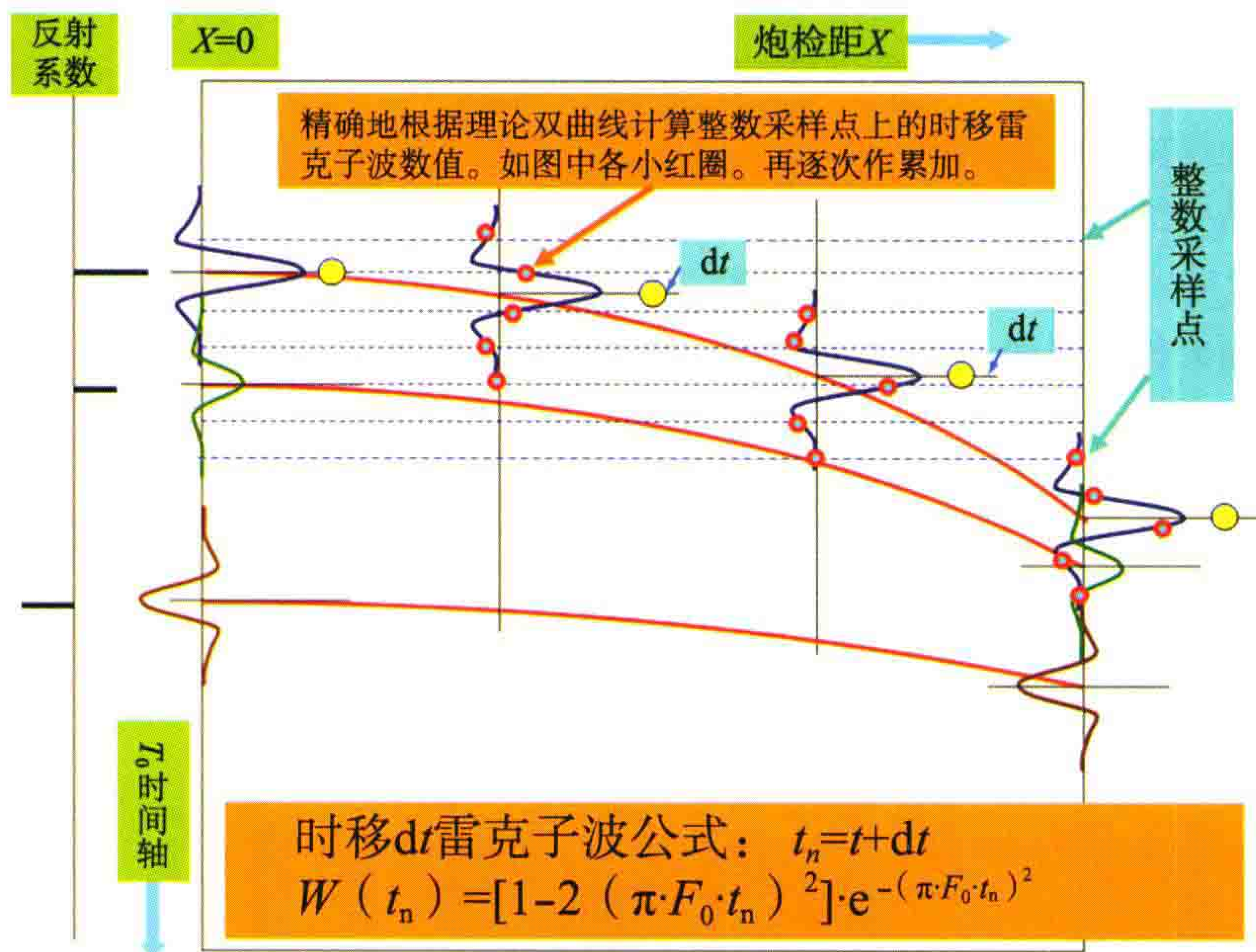


图 45 程序产生的没有 AVO 现象的理论 CMP 道集

该程序在所有样点上的振幅计算都是精确的，不受采样率及四舍五入的影响。采用水平层状介质模型，对每个 T_0 样点使用规定的反射系数，不随炮间距而变，模拟了没有 AVO 现象的理论 CMP 记录。

这说明该程序可以在计算中加入振幅由球面扩散及介质吸收所引起的衰减。但本次理论模型中没有采用，因为我们假定在资料处理中，人们已经通过球面扩散校正，解决了此问题。

该程序也可以采用其他解析子波，同样能作非整数样点上的时移振幅计算。

(2) 自行编制有高保真的动校正计算程序 HINMO。

动校正时间计算都是精确的，不作四舍五入。内插到整数采样点。图 43 所示程序产生的高保真动校正计算结果显示。

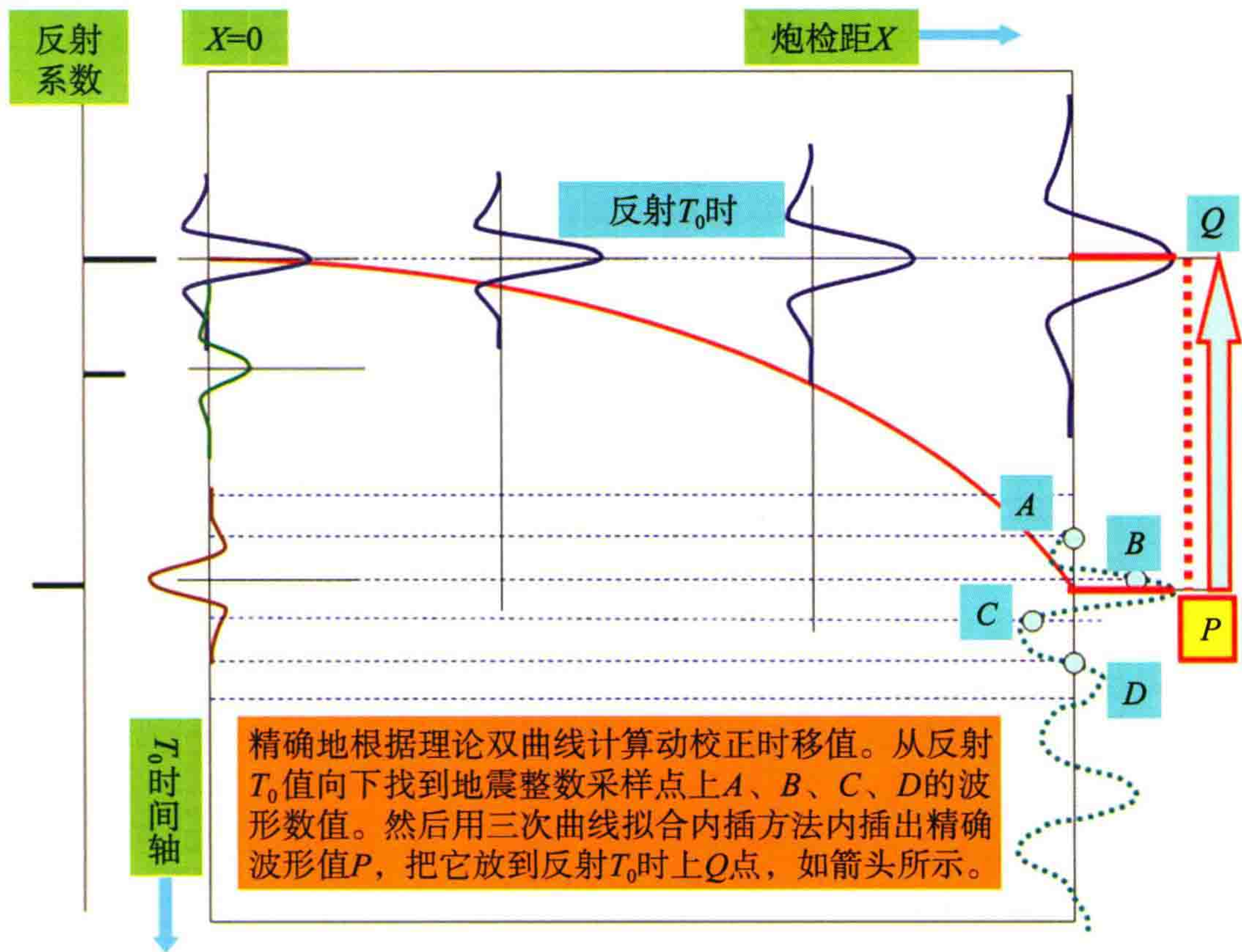


图 46 程序产生的高保真动校正计算结果

先用简单的少数几根同相轴来检验程序的正确性。

采用水平层状介质模型，假设反射振幅不随入射角而改变，即完全没有 AVO 现象。我们来计算一个理论 CMP 道集。

先计算四根分离的双曲线，没有层间干涉，采用 20 Hz 的雷克子波，采样率 2 ms。速度采用第三系盆地典型随反射 T_0 时增加的公式：

$$v_m = v_0 \cdot (1 + B \cdot T_0) \quad (v_0 = 1800\ \mathrm{m/s}, B = 0.3\ \mathrm{s}^{-1})$$

这样就形成了如图 47 所示的一个完全没有 AVO 现象的理论 CMP 道集。在这个道集中，远道、近道所有道的波形都严格相同，且波峰振幅严格等于 1.0。

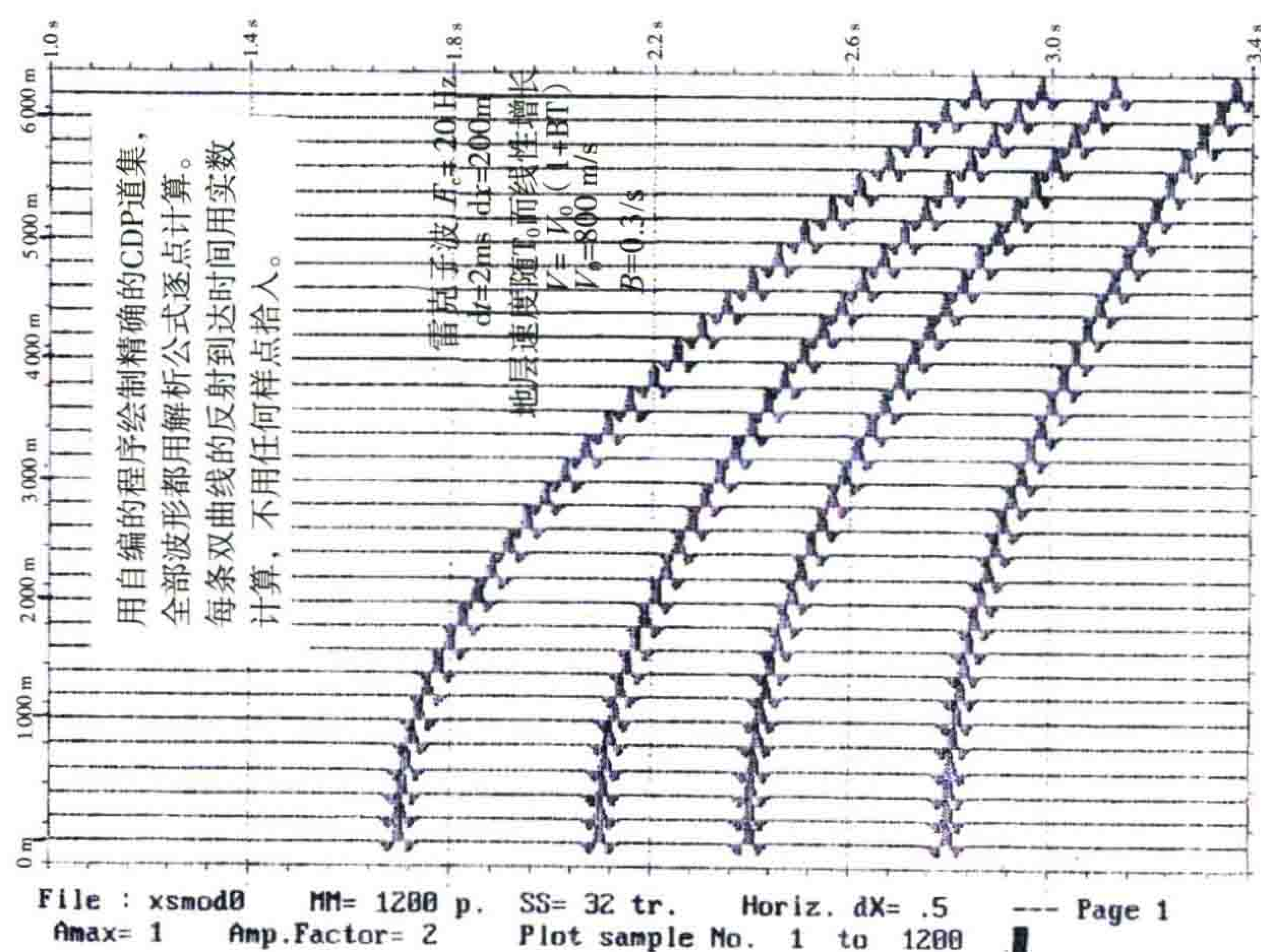


图 47 完全没有 AVO 现象的理论 CMP 道集

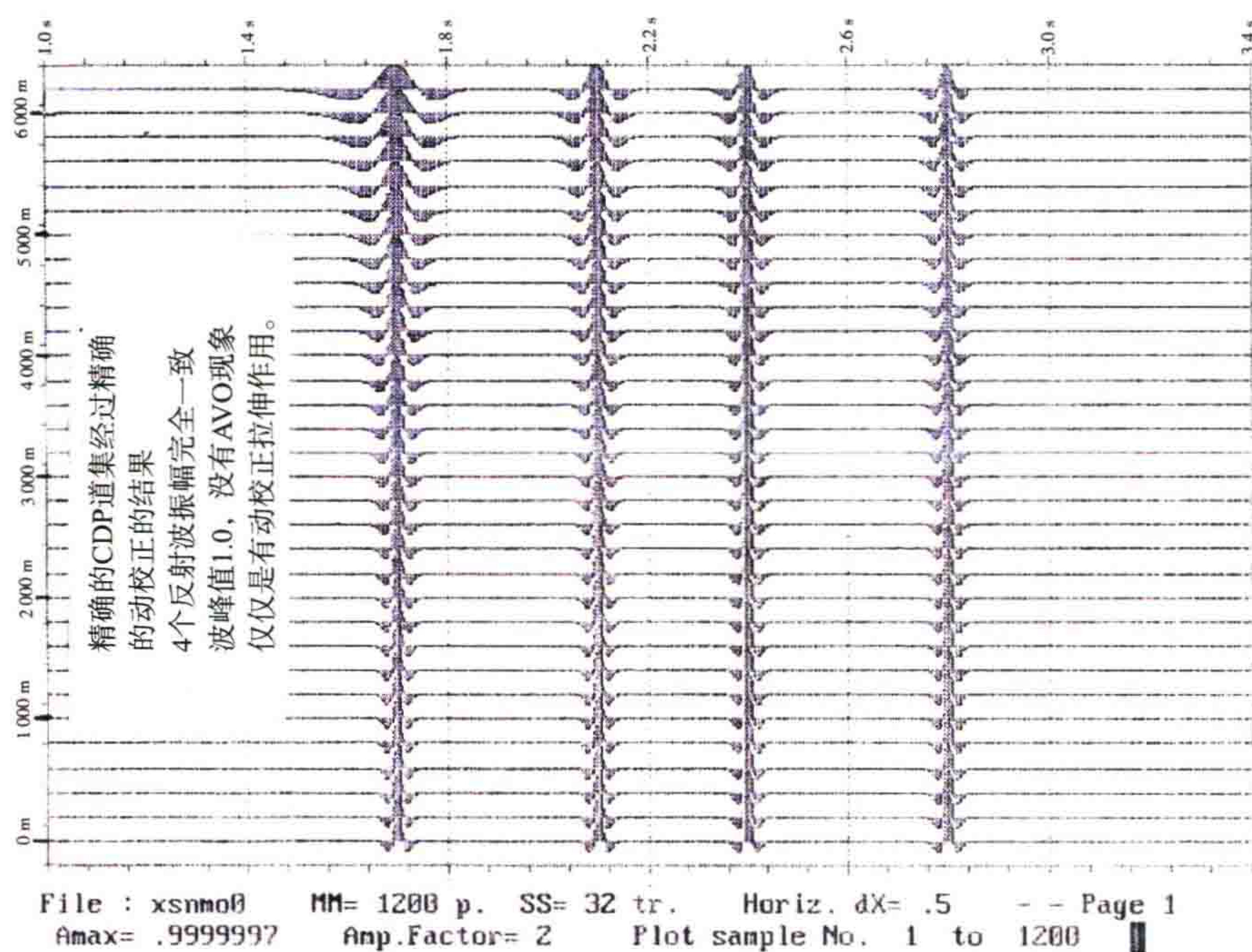


图 48 理论 CMP 道集高保真动校正结果

图 48 所示为对该完全没有 AVO 现象的理论 CMP 道集进行高保真动校正后的结果。高保真的动校正计算后，四个同相轴的中央波峰样点完全拉直，且波峰振幅严格为 1.0。

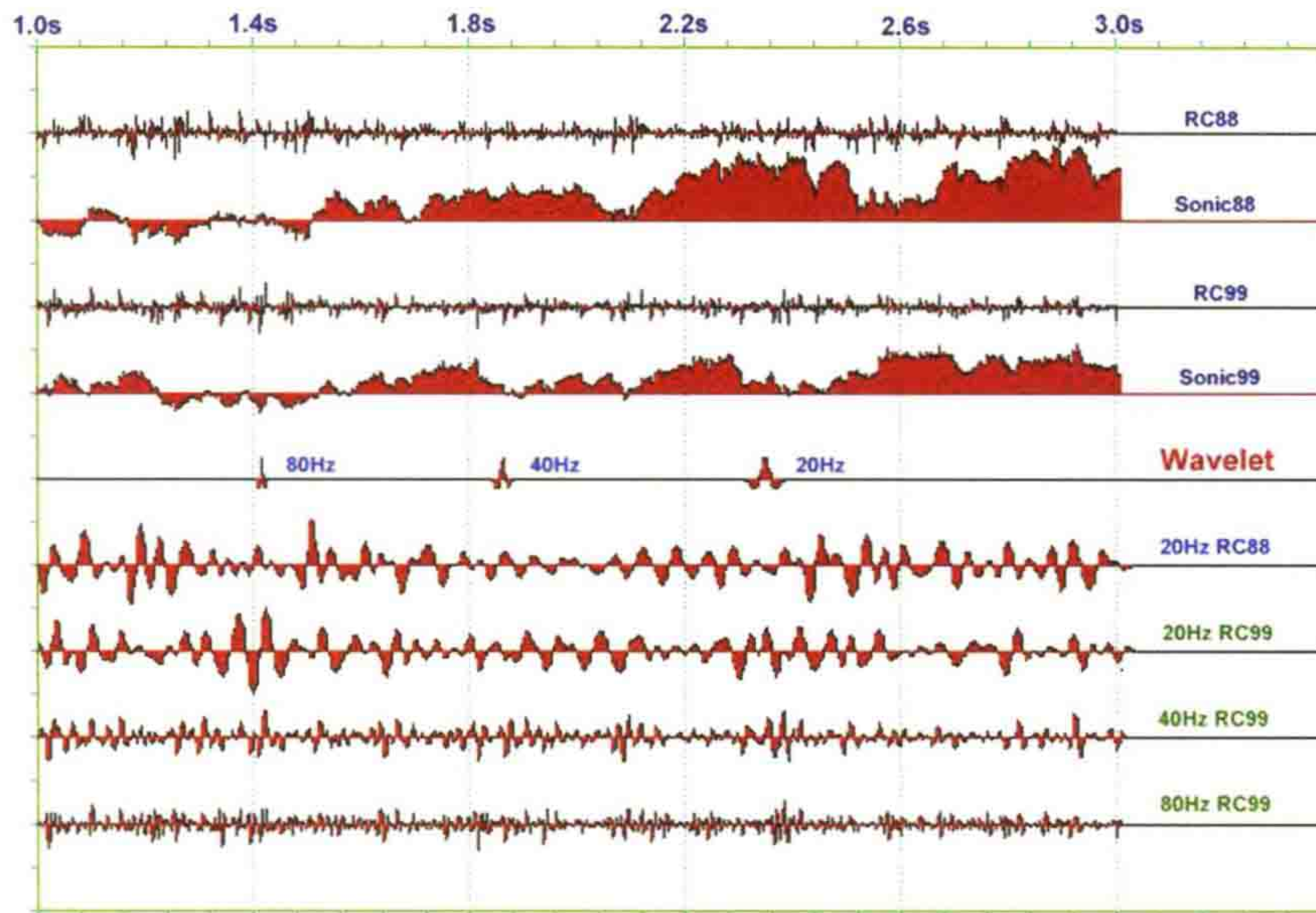
以上说明**如果没有相邻样点的波形互相干涉，就不会出现假 AVO 现象**。

第一个例子，模拟水平层状介质模型的情况。

输入一串反射系数序列，不断褶积一个雷克子波，精确合成一个 CMP 道集。再作高保真的动校正。图 49 所示为两个反射系数模型、声波曲线、雷克子波，及合成的地震道。图 50 所示为利用合成道形成的地震记录。

Comparison of synthetic seismic (To) trace with RC & sonic

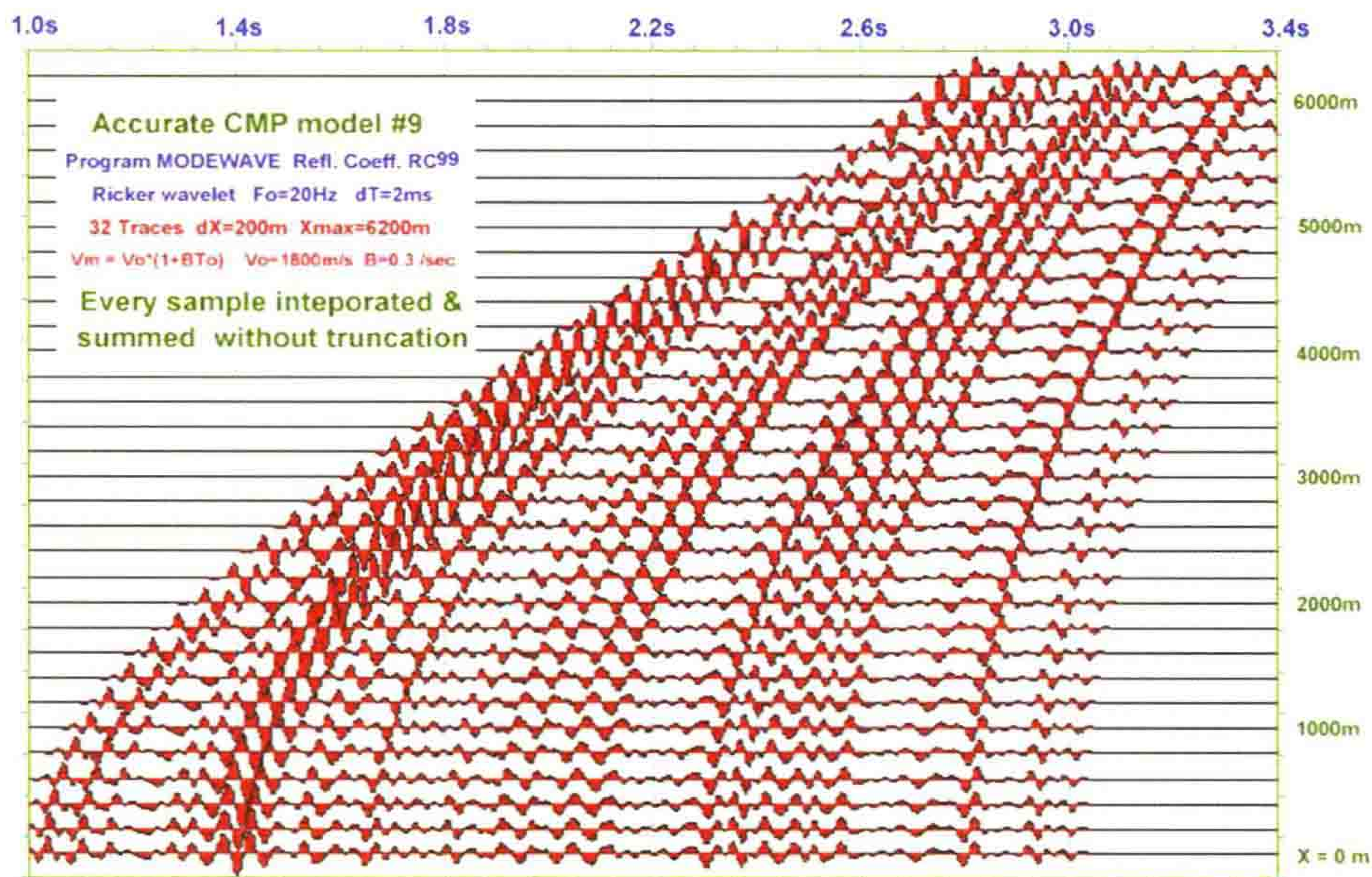
---- False AVO effect due to refl.coeff. interference



File : h91 MM= 1200 p. LL= 9 tr. Horiz.dots/sample= .5
Amax= 3.412892 Full Scale= 4 Plot sample No. 1 to 1200

图 49 两个反射系数模型、声波曲线、雷克子波及合成地震道

Accurate CMP #9 before HINMO --- without AVO effect originally



File : xsmod9 MM= 1200 p. LL= 32 tr. Horiz.dots/sample= .5
Amax= 3.212434 Full Scale= 2.2 Plot sample No. 1 to 1200

图 50 利用合成道形成的地震记录

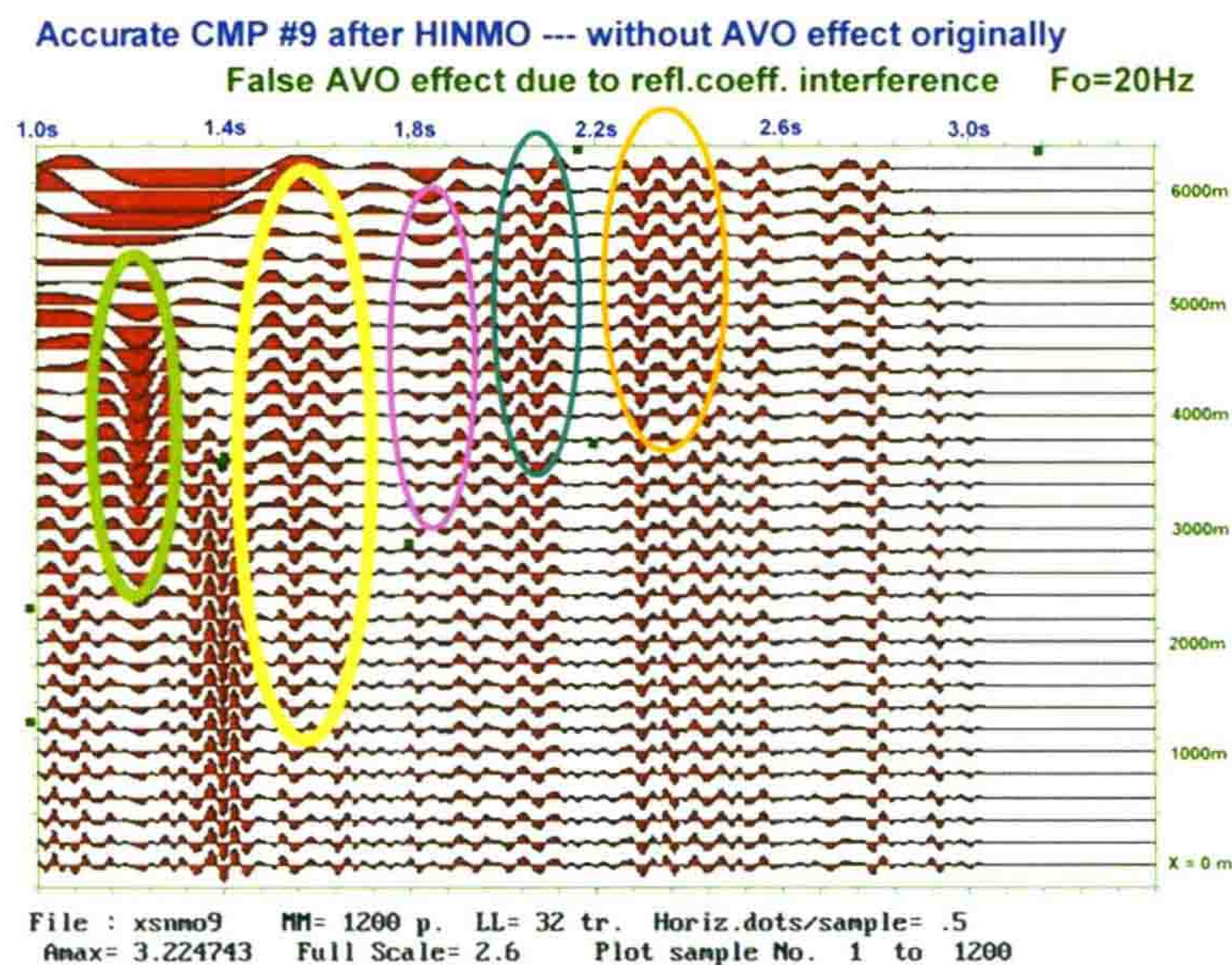


图 51　对合成地震记录高保真动校正结果

图 51 所示为对合成地震记录高保真动校正的结果。**高保真的动校正计算后，同相轴完全拉直，但是有了假 AVO 现象**。这说明以上例子的 CMP 道集为 1～3 s 反射层，炮检距 0～6000 m 的情况，在 CMP 道集中，图中纵坐标的数据还要除以 2。

让我们来分析一下假 AVO 现象与反射入射角及切除线的关系。

华北统一速度（东营）射线图板

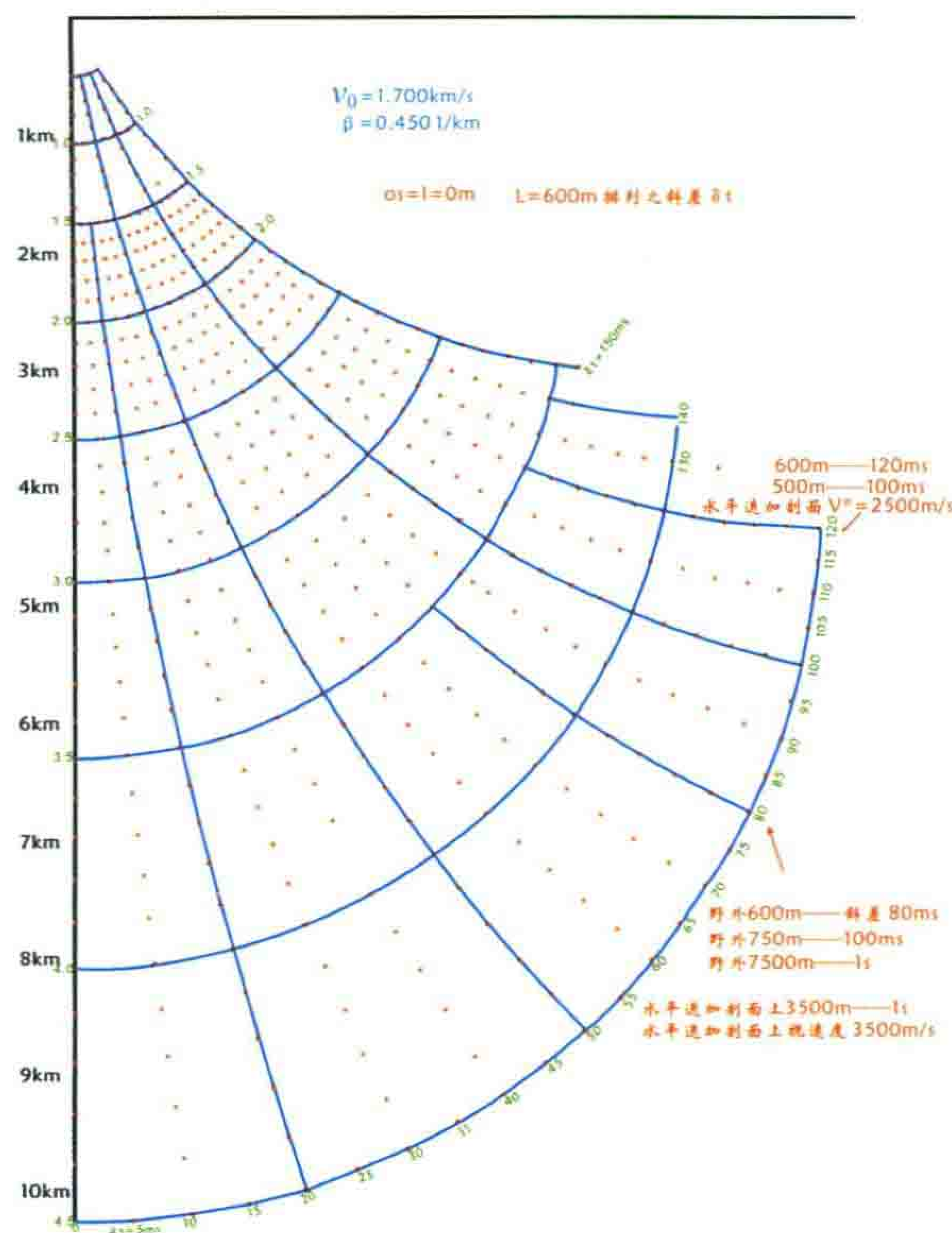


图 52　用曲射线方法求倾角射线图板

采用如图 52 所示的求倾角射线图板和表一水平界面曲射线时距曲线倾角关系数据表。图 53 为射线簇显示。

表 1 水平界面曲射线时距曲线倾角关系表

水平界面曲射线时距曲线及射线倾角关系表 $W_m = V_0 \cdot (1 + BB \cdot T_0)$ $V_0 = 1800$ m/s $BB = 0.3/s^{-1}$)						
深度层号	初始角	反射角	时间	横距离	埋深	有效速度
	l_o	l_c	tt	xx	HH	V_{ef}
N_{10}	24	30	0.557	530.9	1029	2079
			1.114	1062		
	35	45	0.649	876.8	1028	2081
			1.298	1754		
	52	75	1.205	2311	1028	2099
			2.410	4622		
N_{15}	21.5	30	0.898	888.3	1789	2224
			1.796	1777		
	31	45	1.032	1445	1789	2228
			2.064	2890		
	44.5	75	1.697	3384	1789	2255
			3.394	6768		
N_{20}	20	30	1.258	1295	2684	2369
			2.516	2590		
	28	45	1.434	2099	2684	2376
			2.868	4198		
N_{25}	19	30	1.626	1713	3715	2516
			3.252	3426		
	27.5	45	1.848	2826	3715	2526
			3.696	5652		
N_{30}	19	30	2.008	2188	4881	2663
			4.016	4376		
	23	45	2.253	2533	4881	2674
			4.506	5066		

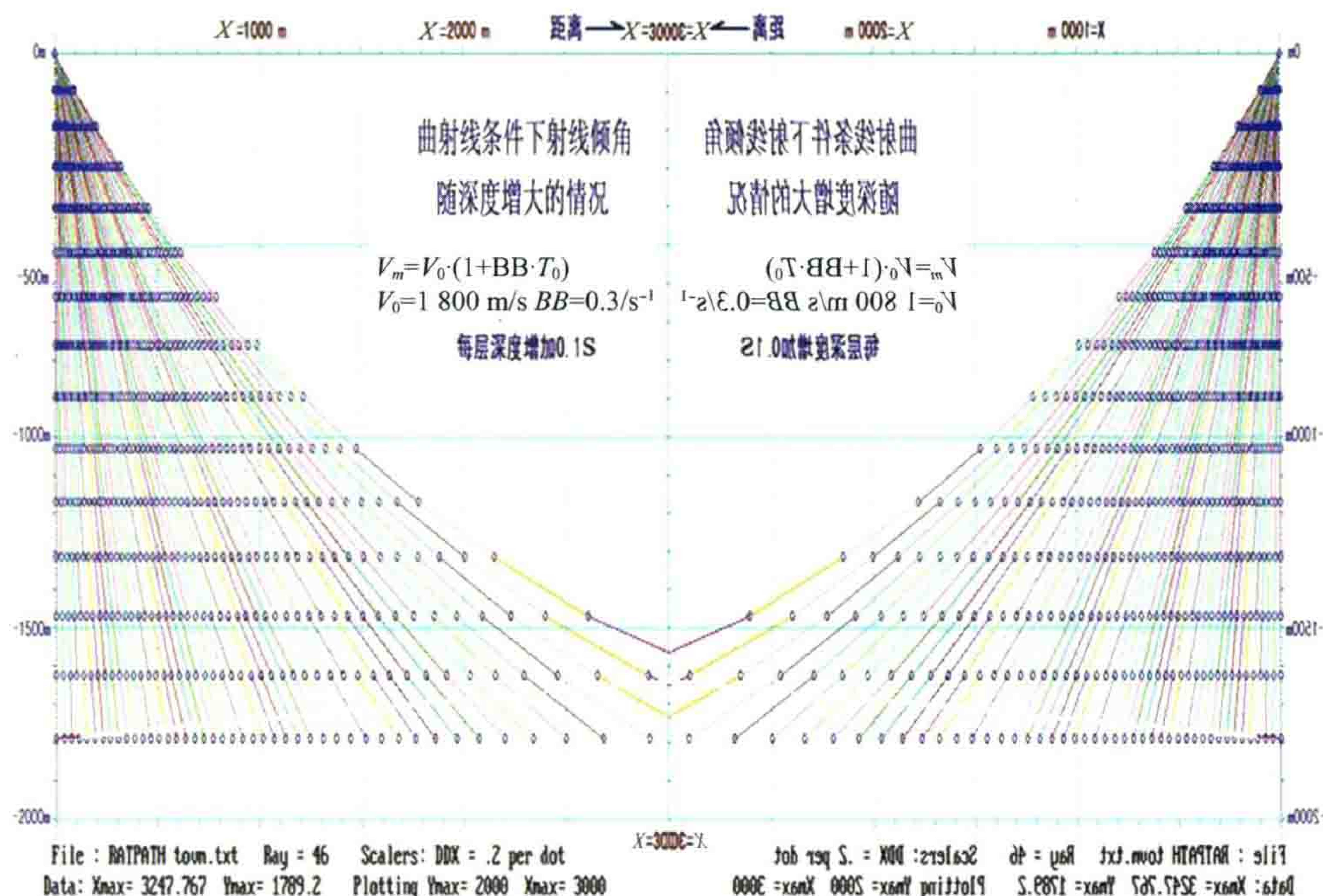


图 53 射线簇显示

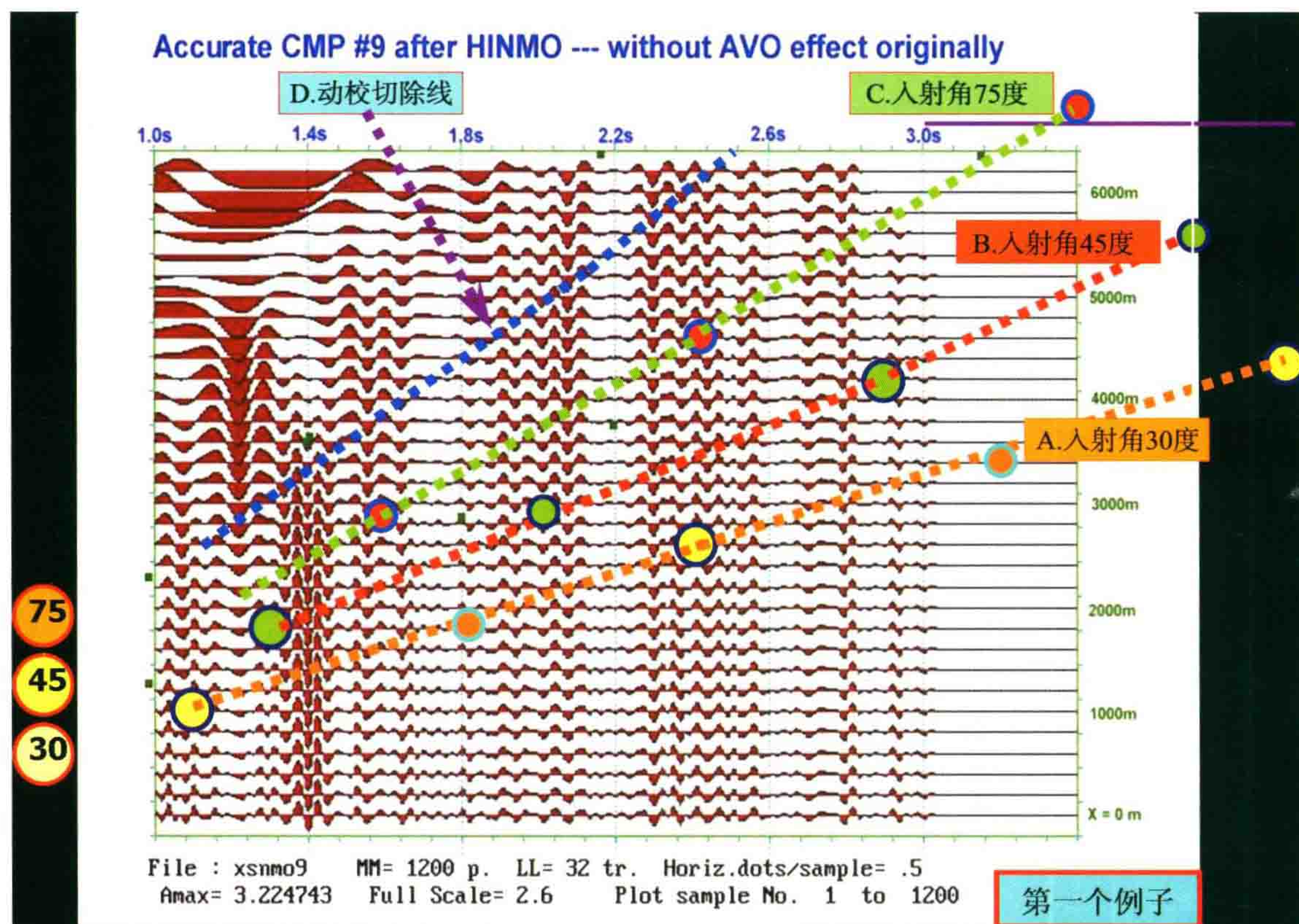


图 54 前面例子在动校后不同入射角的记录及动校切除线位置

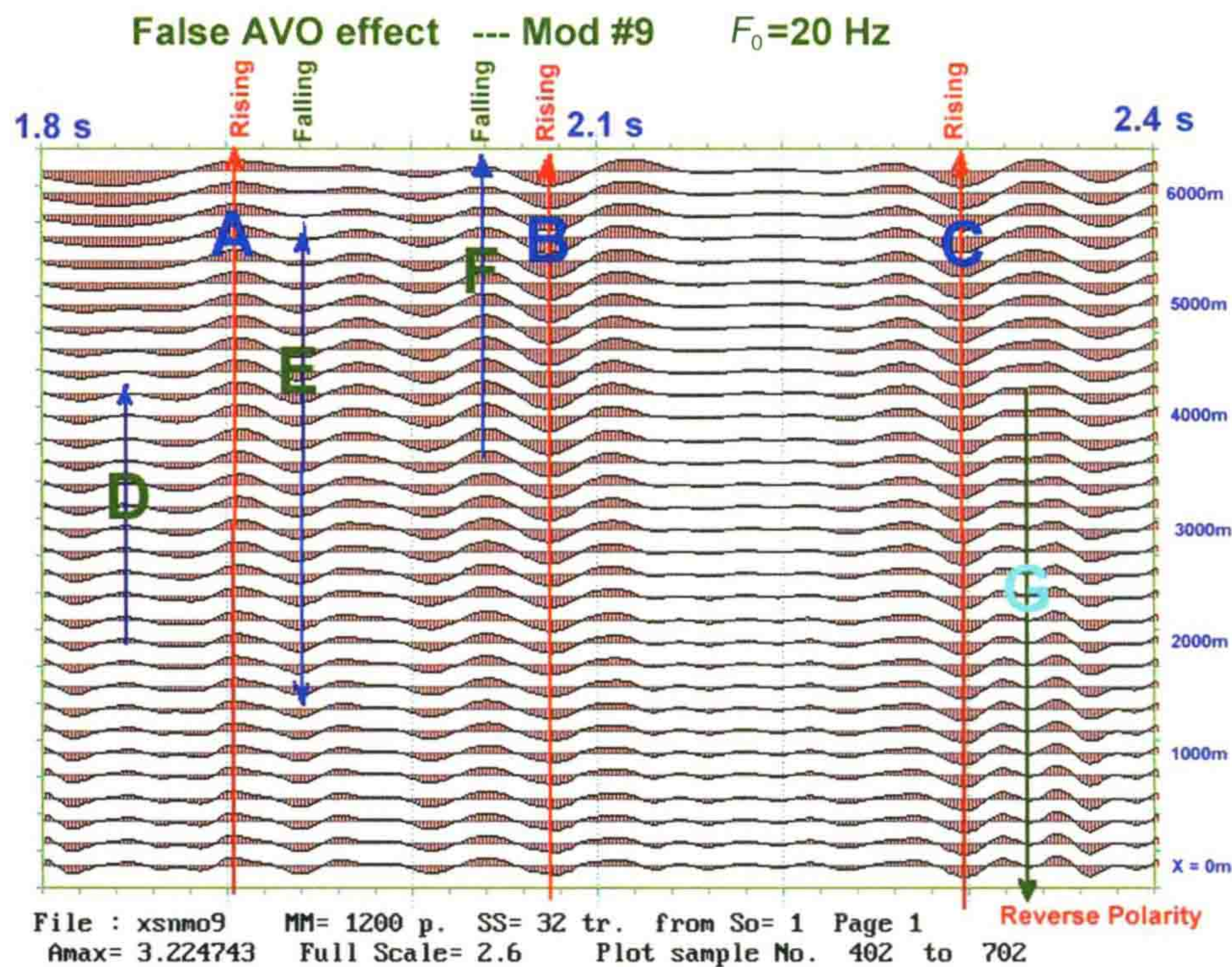


图 55 局部放大显示

图 54 为前面例子在动校后不同入射角的记录及动校切除线位置，图 55 为其从 1.8～2.4 s 的局部放大显示。**从局部放大图可看出，具有明显的假 AVO 现象。**图 56 和图 57 为不同表示方法的典型假 AVO

现象的振幅曲线。

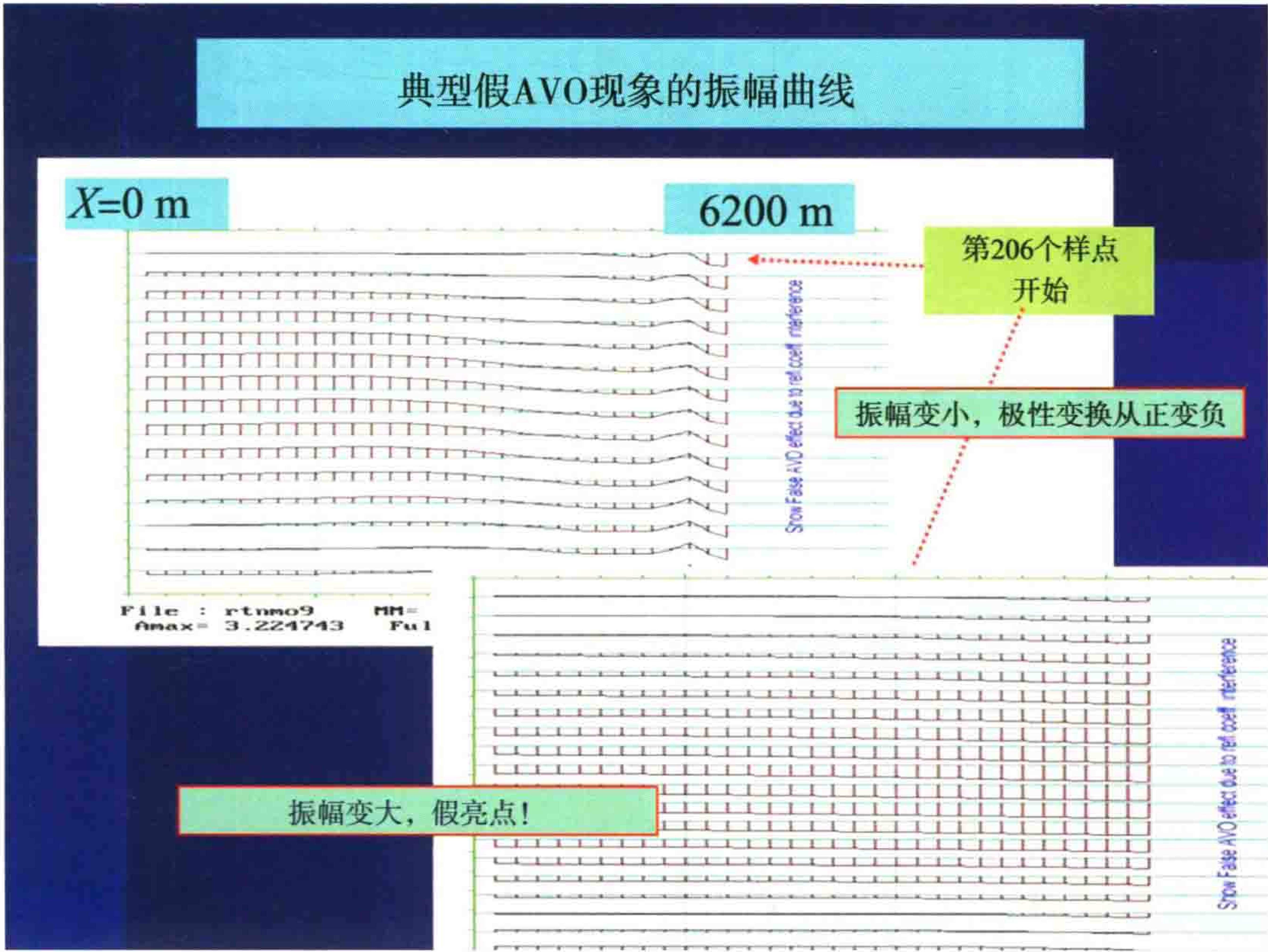


图 56 典型假 AVO 现象的振幅曲线

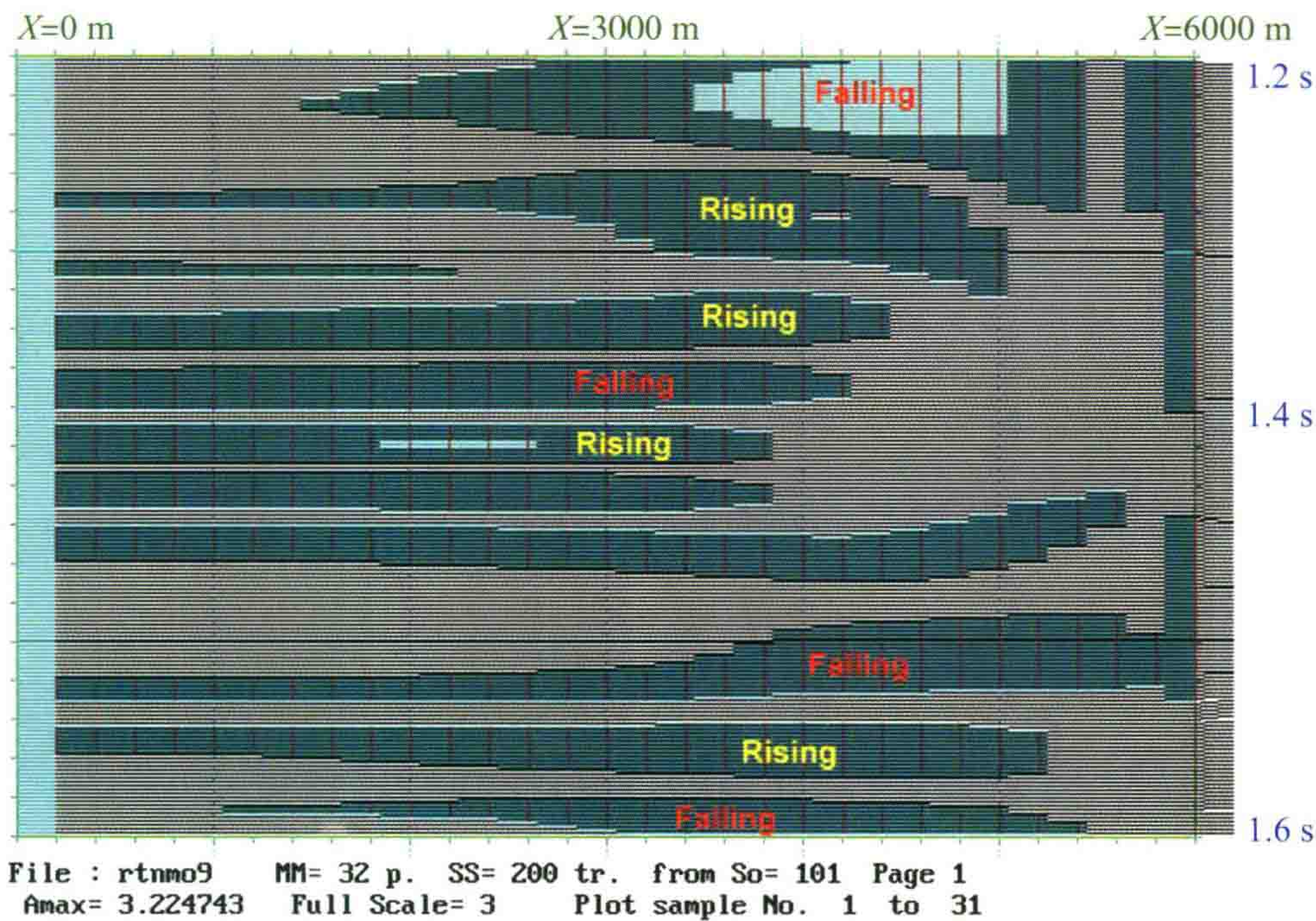


图 57 另一种图示方法

将前面有 AVO 异常的图件，统一减去 T_0 道波形，就会得到如图 58 所示纯粹由大排列引起的 AVO 异常。

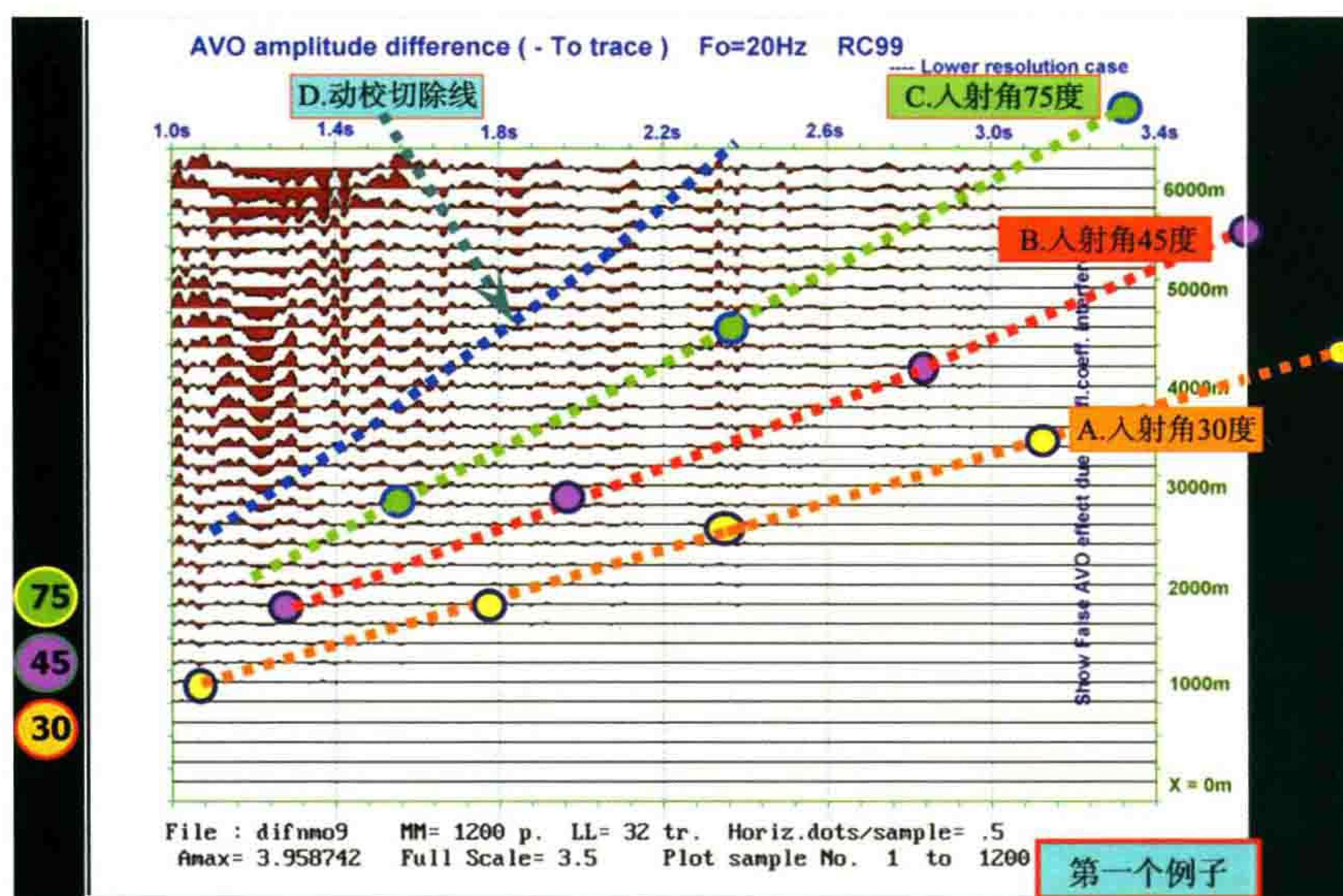


图 58　把每道波形减去底部第一道(T_0 道)波形后的结果

(三) 小结

当入射角大于 45°范围时，会产生层间干涉所引起的假 AVO 现象，值得注意！

要避免此现象的发生是不可能的，想解决此问题，必须已知 T_0 道上的反射系数序列，而这也是很难做到的(只有井旁道上才有可能)。

图 59 为不同分辨率记录减去 T_0 道的剩余振幅情况比较，通过比较可知，提高地震记录分辨率可以减轻假 AVO 现象的产生。

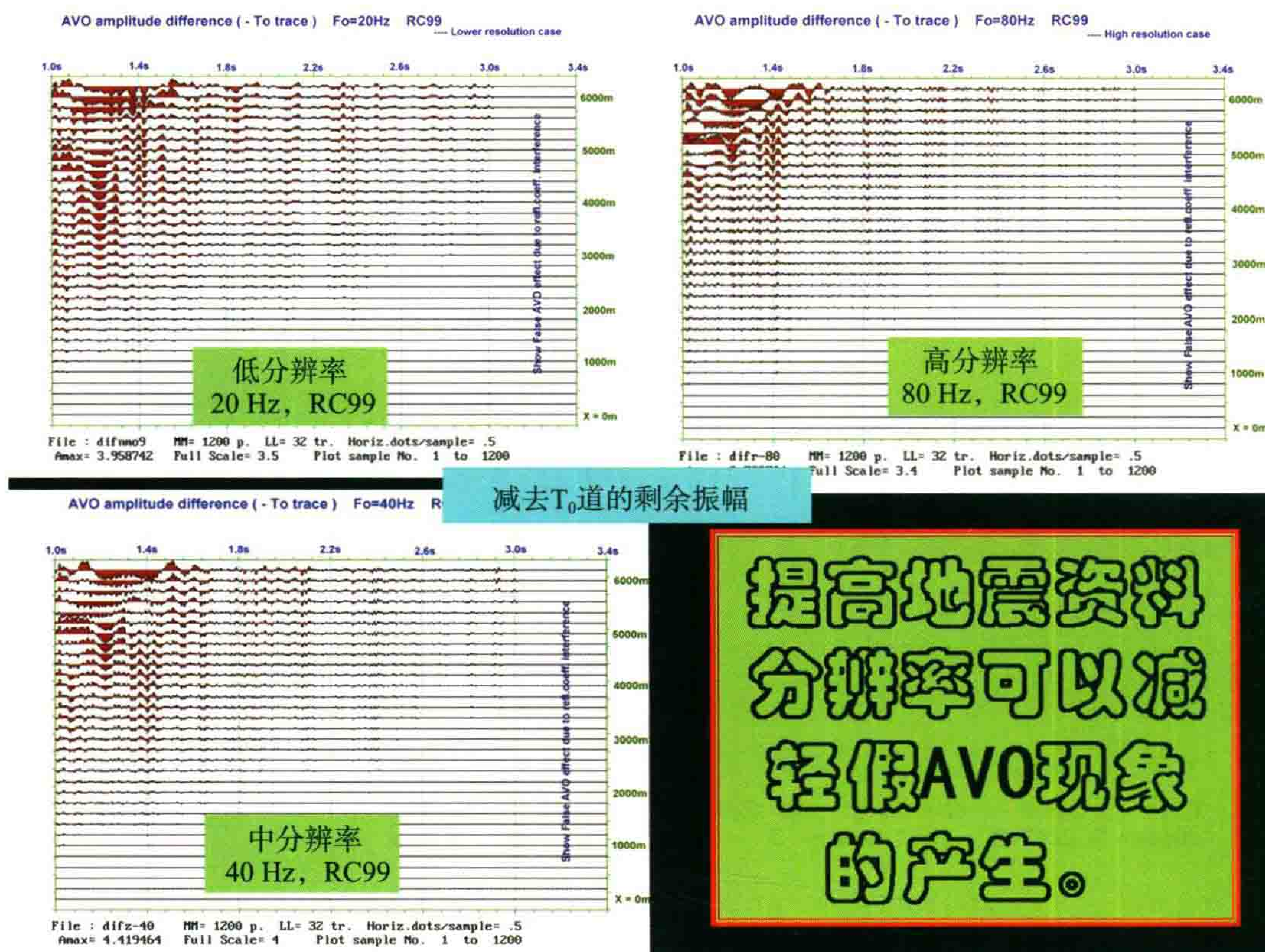


图 59　不同分辨率记录减去 T_0 道的剩余振幅情况比较

结论：由于相邻反射系数褶积子波后在远道处产生波形干涉，动校过程中又不可能解决此种波形干涉，因此，不可避免地会发生假 AVO 现象（动校拉伸也是不可避免的）。所以今后 AVO 反演中，角道集的选取时，必须谨慎地保持入射角在 45 度范围以内，使用大排列资料时要警惕了。

四、为了三维资料联片，"有效频宽"只能迁就差的区块，通频带进一步变窄

图 60 展示了大连片资料处理后的效果，表明大联片地震剖面起到了很好的作用。但是三维大连片是无奈的，如图 61 所示，连片处理后剖面的反射主频越来越低。如图 62 和图 63 所示的例子，连片处理后剖面波形呆板，主频很低。

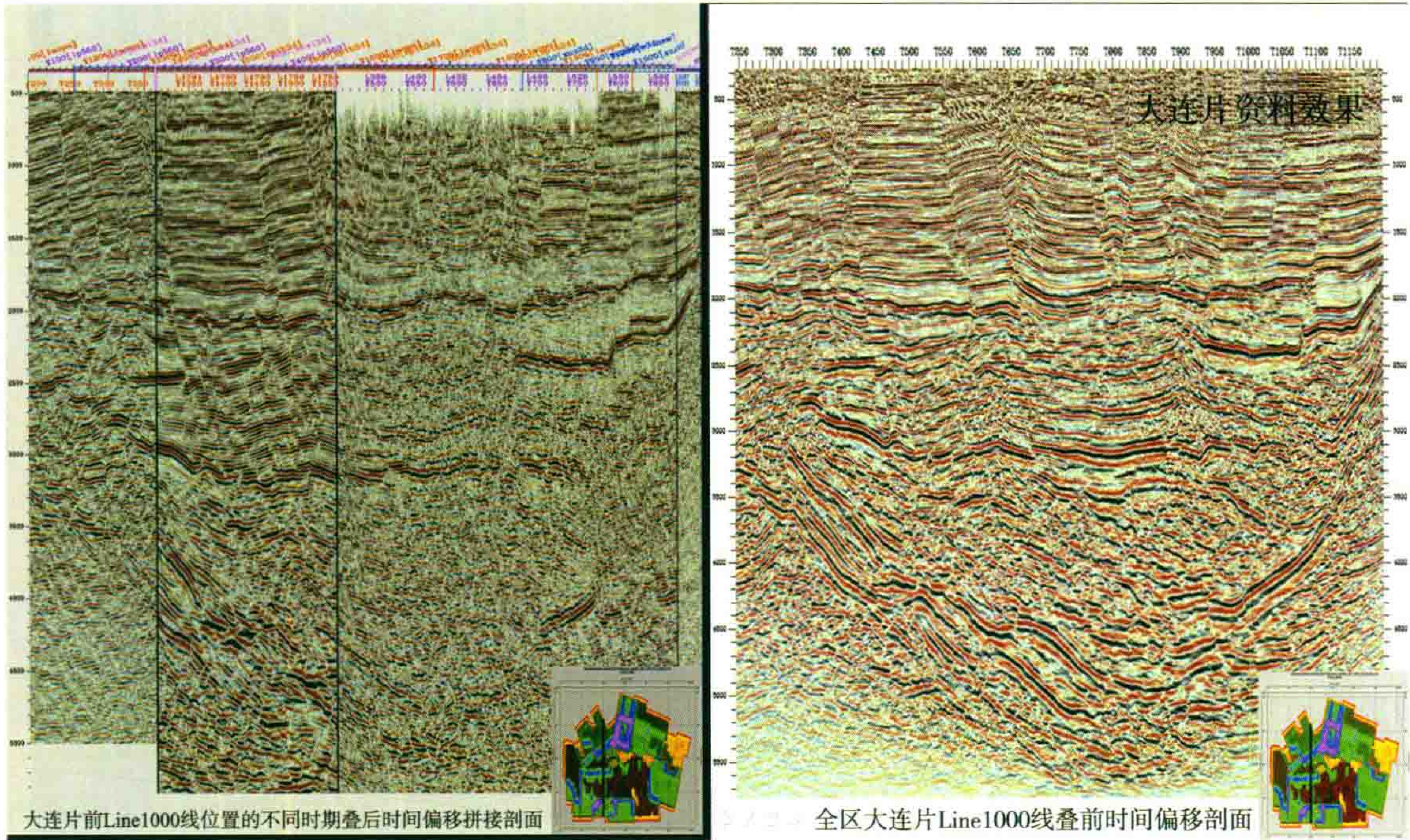
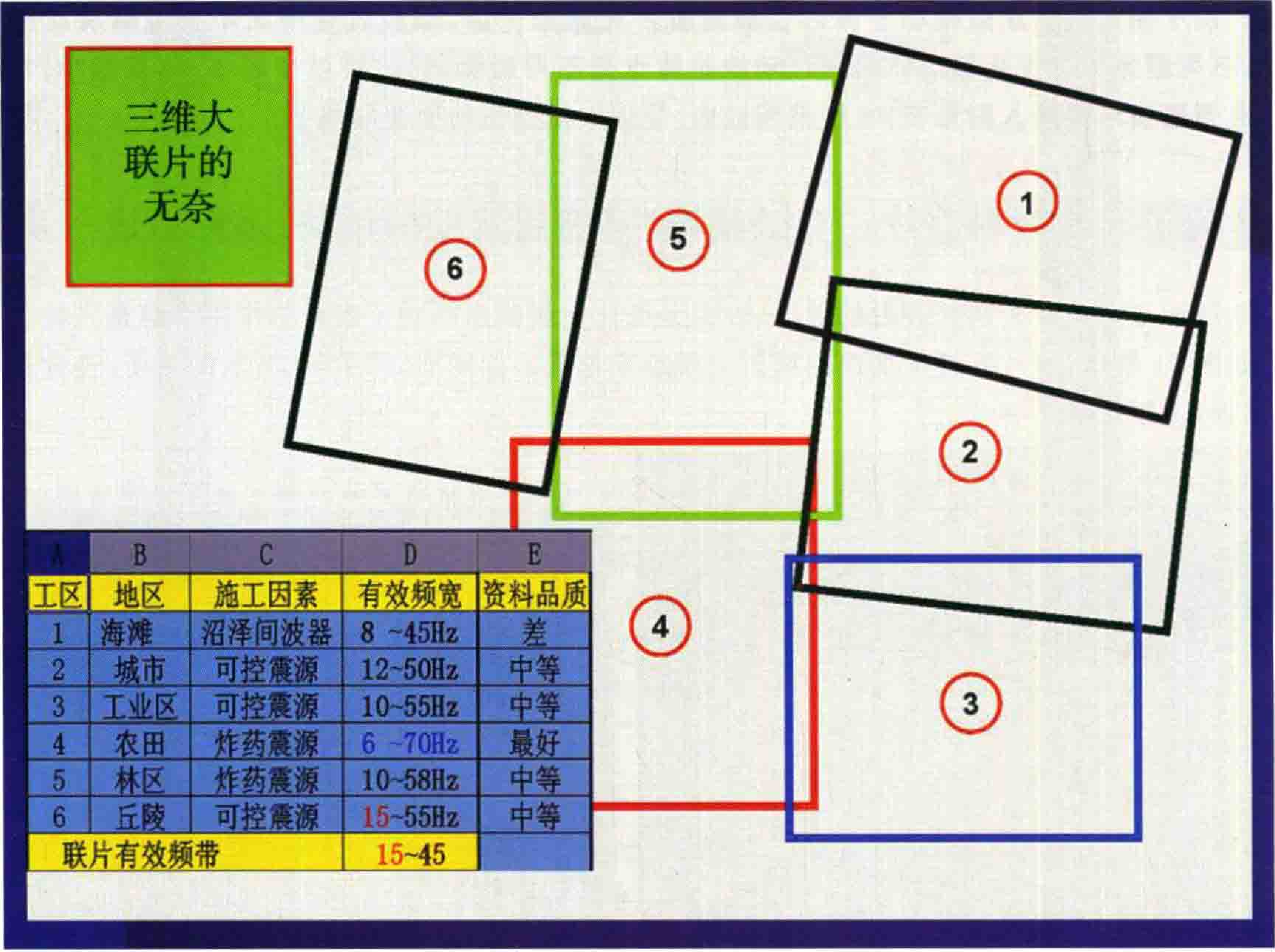


图 60　大连片资料效果



A	B	C	D	E
工区	地区	施工因素	有效频宽	资料品质
1	海滩	沼泽间波器	8 ~45Hz	差
2	城市	可控震源	12~50Hz	中等
3	工业区	可控震源	10~55Hz	中等
4	农田	炸药震源	6 ~70Hz	最好
5	林区	炸药震源	10~58Hz	中等
6	丘陵	可控震源	15~55Hz	中等
联片有效频带			15~45	

图 61　三维连片示意图及连片后的有效频宽

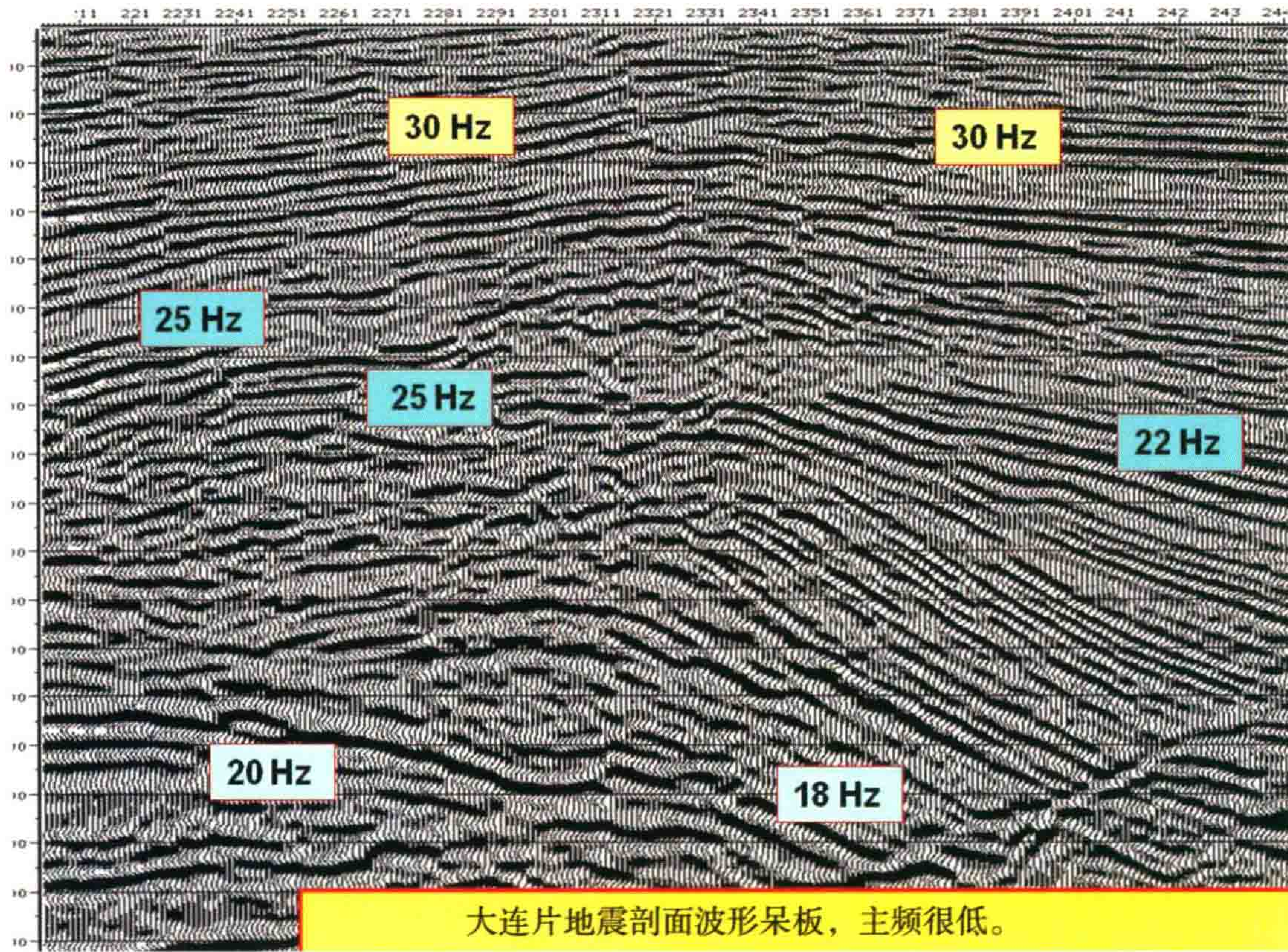


图 62　大连片处理后的地震剖面之一

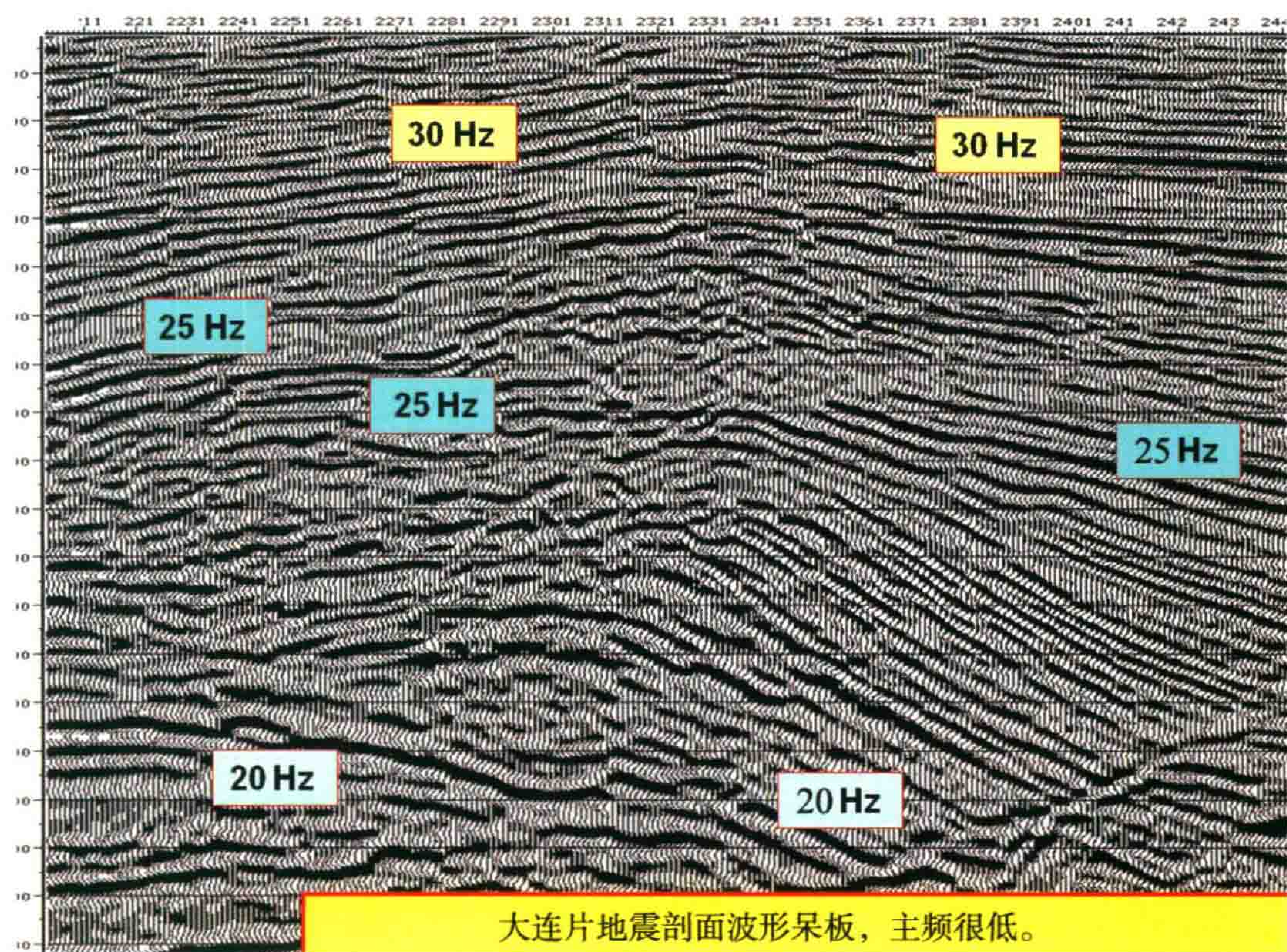


图 63　大连片处理后的地震剖面之二

（一）解决办法

(1) 通过分频扫描，查明三维各分块的“有效频宽”，对个别频带不够好的工区重做三维，再重做资料联片。

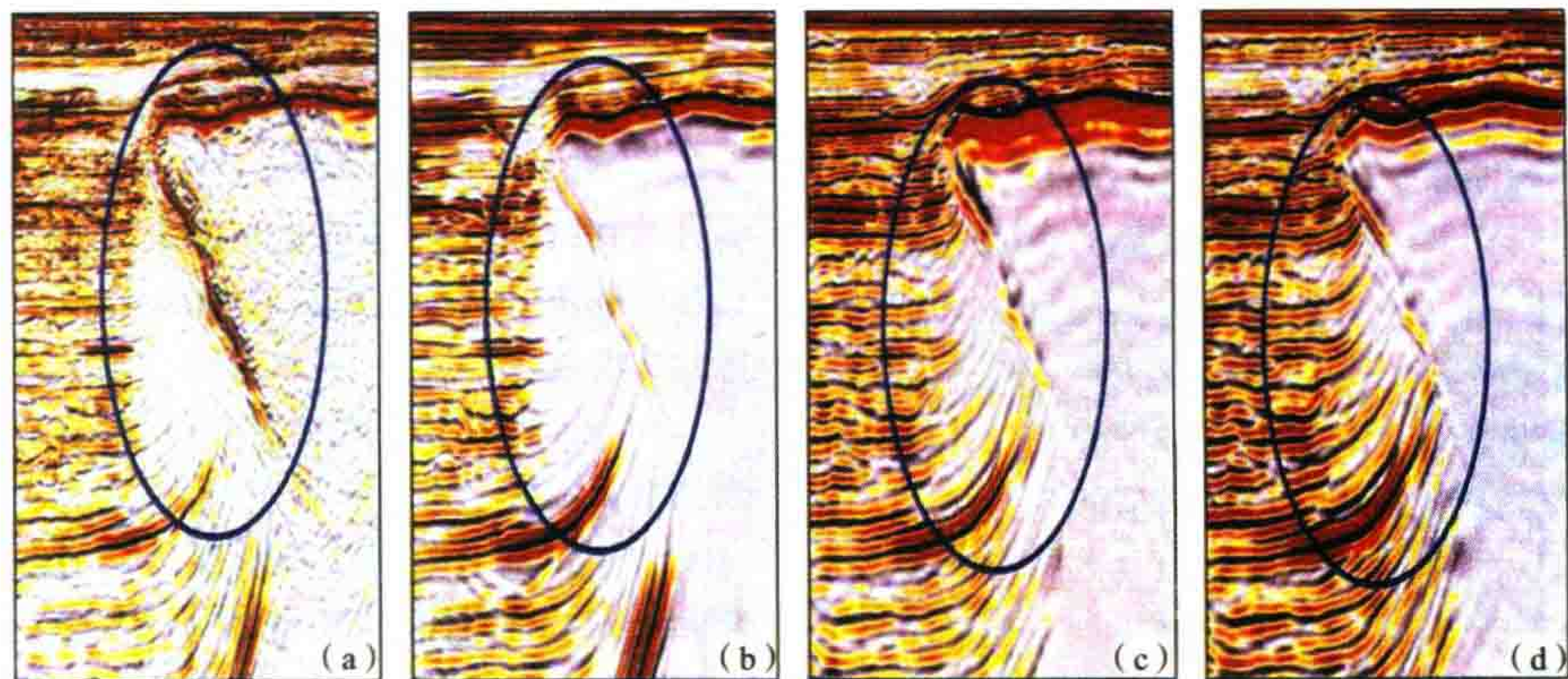
(2) 把大连片剖面仅仅限于研究区域构造，而对于从事正常勘探布井工作仍旧使用分片三维。

(3) 针对各分片之间的“结合部”，可用联片资料研究发现新构造，例如“千米桥潜山”的发现。

对“千米桥潜山”的发现，中石油的报道里只宣称是某地质师“不信大港的古潜山是公的(不是母的)”所获得的成就，还有归结到钻井“欠平衡钻井”新技术的功劳。其实，当时主要应归功于物探局研究院帮油田完成了大港地区三维联片处理，在几片三维的夹缝里发现了“千米桥潜山”，这才是事实的真相。

近年来由于处理手段愈来愈复杂，成像质量逐渐变好，但分辨率逐步变差。

下面一例可以说明问题(当然如果处理流程中如果能始终保持同相叠加，问题可以得到缓解)。



(a) 克希霍夫偏移；(b) 约束偏移(CBM)；(c) 单程波动方程偏移；(d) 逆时偏移

图 64　外国公司展示的不同偏移方法效果对比

如图 64 外国公司所展示的不同偏移方法效果对比剖面图，从左到右，从普通的克希霍夫偏移到逆时偏移，成像质量逐渐变好，但分辨率逐步变差。

最近曹聿明列举了分辨率很高的海上单次剖面(图 65)，他认为如果不是担忧多次波干扰的话，不需要大炮检距。

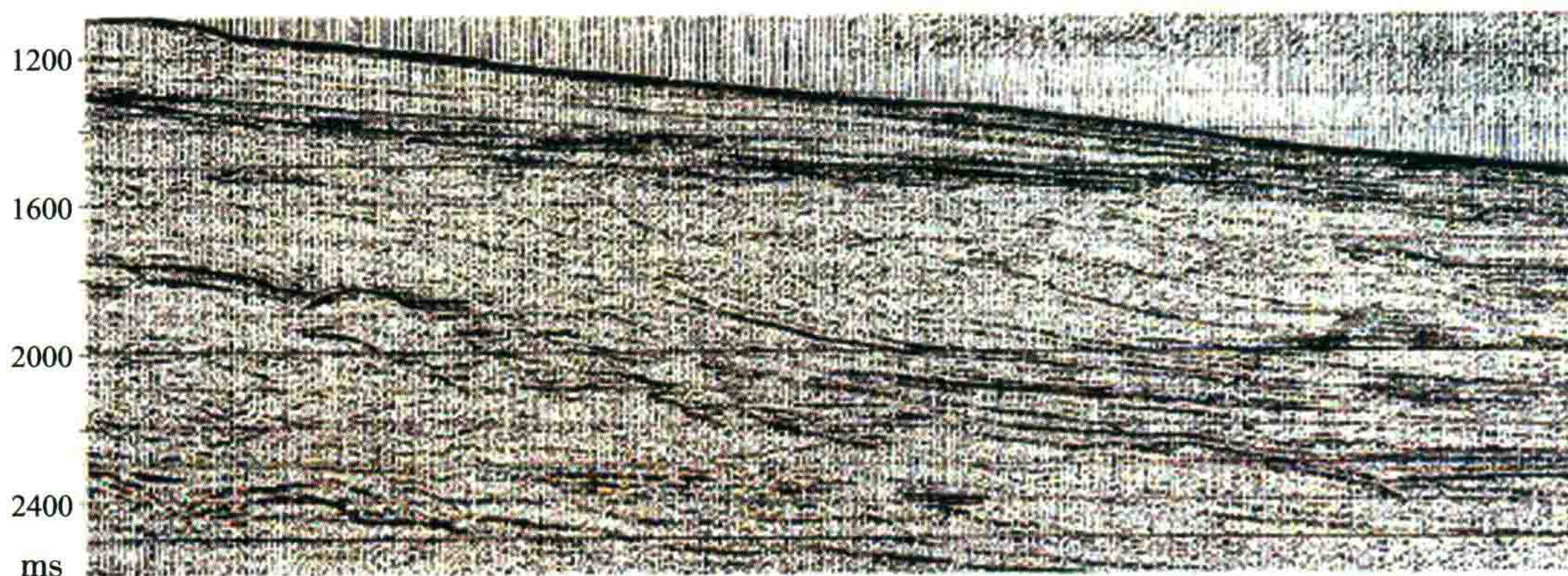


图 65 海上最小炮检距道地震剖面(曹聿明提供)

(二) 我的意见

提高剖面分辨率的方法还有。

一般情况下，多次覆盖还是必要的。提高分辨率的出路是拟合 T_0 道剖面，做截距剖面。

我的剔除拟合 T_0 道 DELFIT 程序，剖面效果更好。它能用于三维数据，叠前偏移可以用 CRP 道集作输入，输出分辨率高的三维截距剖面 CUBE。

(三) 剔除拟合法的特点

(1) 剔除拟合法是一种有效的求得纵波正入射 P 波剖面的方法。它采用一边剔除一边拟合的方法，使多次波及随机噪声基本上得到克服。能拟合出一条不带动校拉伸、较少多次波的 P 波剖面[即自激自收(零炮捡距)的纵波正入射剖面]。也可使后续的波阻抗反演技术得到合理的结果。

(2) DELFIT 程序适用于三维数据，在叠前时间偏移中，只要将 CRP 道集(经过反射波拉平)作输入，就可以输出三维的拟合 T_0 道(截距)数据体。

(3) 一般简单地用多项式拟合法求 T_0 道或是用 AVO 流程求 P 波剖面，都没有压制多次波的功能，而剔除拟合法能部分克服了多次波干扰并且保留了 AVO 信息。本方法尚可以获得拟合后的 AVO 道集，T_0 道 P 波剖面及远道剖面，及 FAR-T_0差值剖面等。

(4) 二维的情况下，本方法在克服多次波的能力方面比水平叠加强。输出剖面的分辨率高，并且在动校正速度稍有误差时，并不太影响输出 P 波剖面的精度。

(5) 剔除拟合法在克服随机干扰的能力方面还不如水平叠加。但是一般加上了道集中去噪功能后，可以改进拟合的效果，有时可以和水平叠加效果相当，甚至更好。

(6) DELFIT 可以作三维资料处理，因为该程序由道头字里读取炮检距，不论二维、三维都一样。也适应于处理叠前时间偏移，只要输入用 CRP 道集就行。

(四) 建议立项 1

通过偏移后的反褶积加上拟合 T_0 道(DELFIT)来展宽频谱。

进一步作 DELFIT 三维试验，包括叠前时间偏移。

分频扫描当前存在的问题如下。

(1) 滤波档定义不统一(图 66)。

(2) 忘了加截断时窗处理,有直流成分出现。

(3) 陡度太大,有吉布斯效应,子波多相位震荡(图 67)。

(4) 它们对判断"有效频宽"有时会造成一定的影响。

希望研究院编制统一的模块供大家使用。

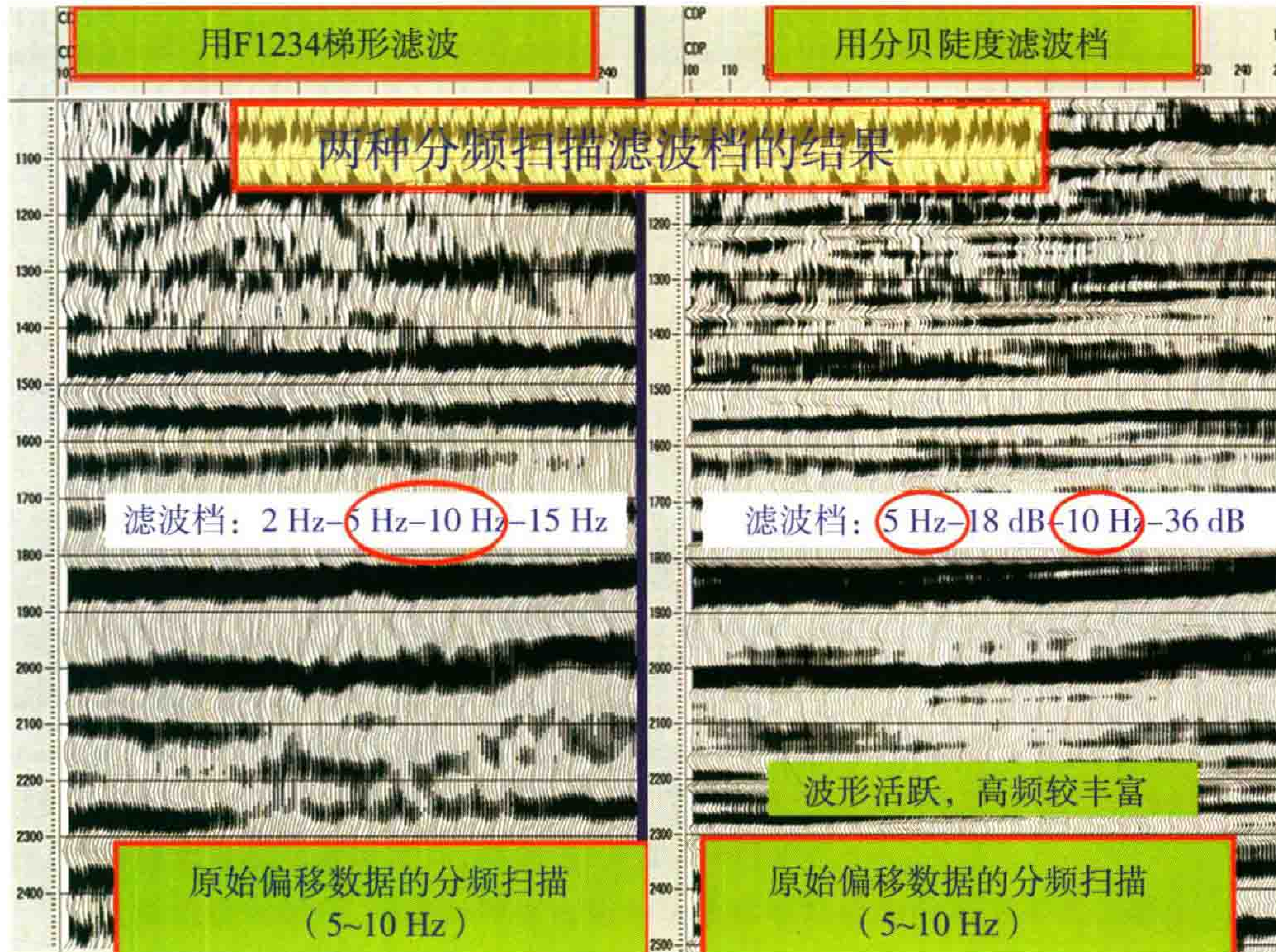


图 66 不同滤波器分频扫描对比

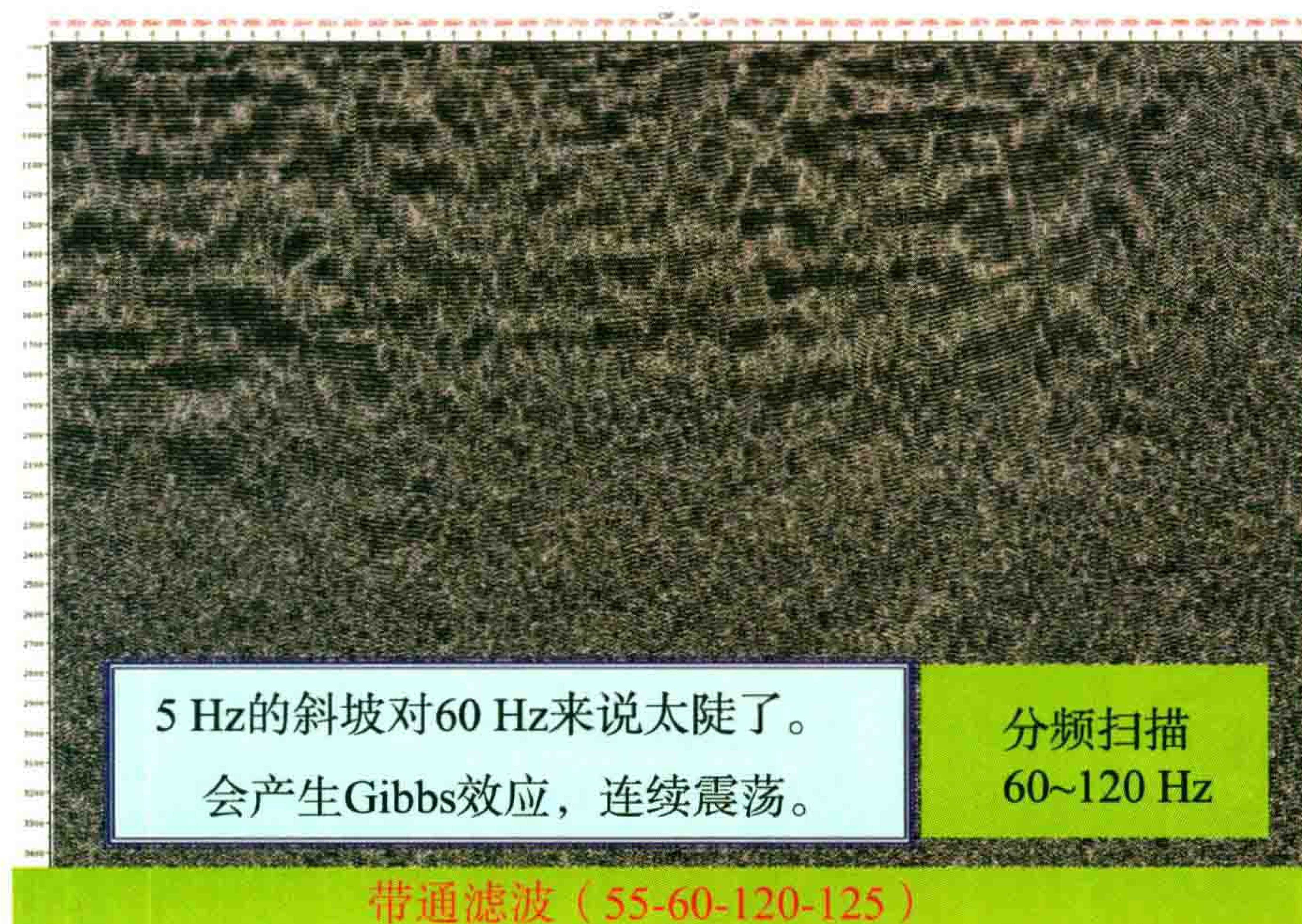


图 67 滤波器斜坡太陡带来的问题

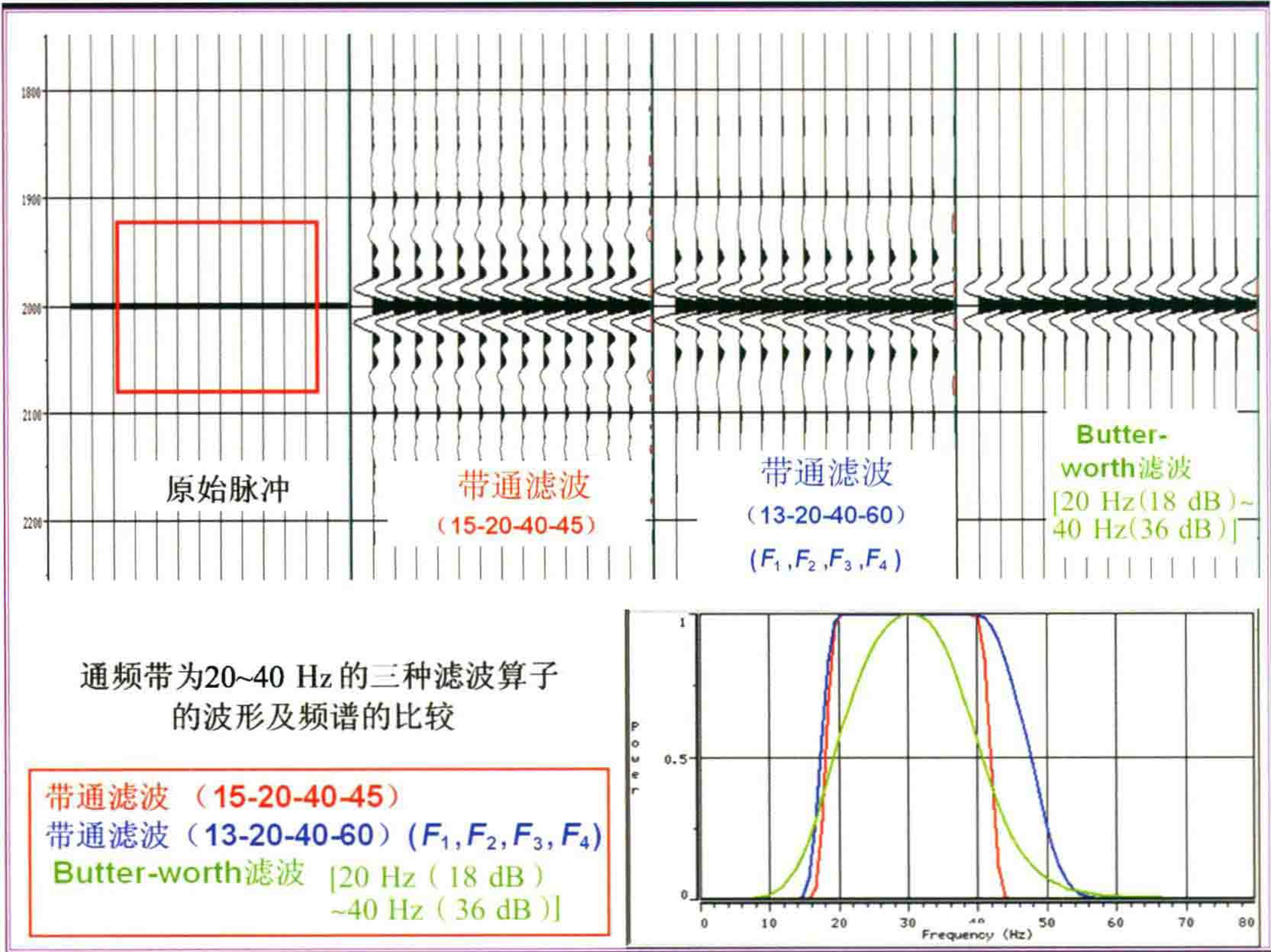


图 68　通频带为 20～40 Hz 的三种滤波算子的波形及频谱比较

(五) 建议立项 2

编制统一的分频扫描软件。

(1) 滤波算子还是 Butter-Worth 的比较好，旁瓣小，收敛快(图 68)。$F_2=2\cdot F_1$　(F_1，18 dB；F_2，36 dB)。

(2) 注意加截断时窗。

(3) 显示方便，道数太多可抽稀显示。

(4) 采用最简单的参数卡编码，方便使用。例如：5，10，20，30，40，50，60…。

(六) 建议 3

开展用偏后反褶积或谱白化技术，在分频扫描的指导下，提高出站剖面的分辨率。

研究院处理及解释中心各自组织人员开展合理的拓频试验，年底写出总结报告。对优胜者给予奖励。

五、其他

还有不少问题尚待用分频扫描来进一步提高认识，研究解决。

例如双检，通过分频扫描，可能被认识到根本是不必要的。当陷波坑深不超过－30 dB 时，反褶积可以补平所谓“频谱里的陷波坑”。因为振幅能量是很容易提起来的，关键是这个频率的信噪比够不够。而信噪比与记录灵敏度也基本没有太大关系。

关于数字检波器与模拟检波器的好坏通过分频扫描也应该有所共识。

文章编号 312

石油物探领域的创新意识与求实精神

——为庆祝我国物探事业光辉的60年有感而发



这是2011年2月，我在上海“石油物探技术发展高层论坛”会上的大会发言稿，是为庆祝我国物探事业光辉的60年有感而发。

“新中国成立以来，我国石油物探事业取得了飞跃发展，我们亲身经历。过去60年来，地球物理勘探为我国寻找石油天然气事业立下了汗马功劳，全国油气储量的90%以上是用物探方法找到的。”

我国物探技术已经在7个方面可以称得上具有世界先进水平。但是目前我们还有7点遗憾。“7点遗憾”呼唤着我们的求实态度；后面“10个方向”呼唤着我们的创新精神。今后我们物探技术进步及健康发展，靠的是“求实与创新”。

在文章的最后部分，作者对物探市场的政策体制及机制改革方面谈了看法，认为它们严重影响着物探事业的发展。

此文2011年12月发表于《石油地球物理勘探》第6期，作者李庆忠。

前言

新中国成立以来，我国石油物探事业取得了飞跃发展，我们亲身经历。

过去60年来，地球物理勘探为我国寻找石油天然气事业立下了汗马功劳，全国油气储量的90%以上是用物探方法找到的。

除老君庙、陕北延长老油矿外，我国绝大部分油田为第四系沉积所覆盖，而西部构造往往地面构造和地下构造不吻合，只能用地震勘探的方法来搞清地下构造形态。

图1是Jean Laherrere 2006年所统计的全世界历年来石油发现量的图件。

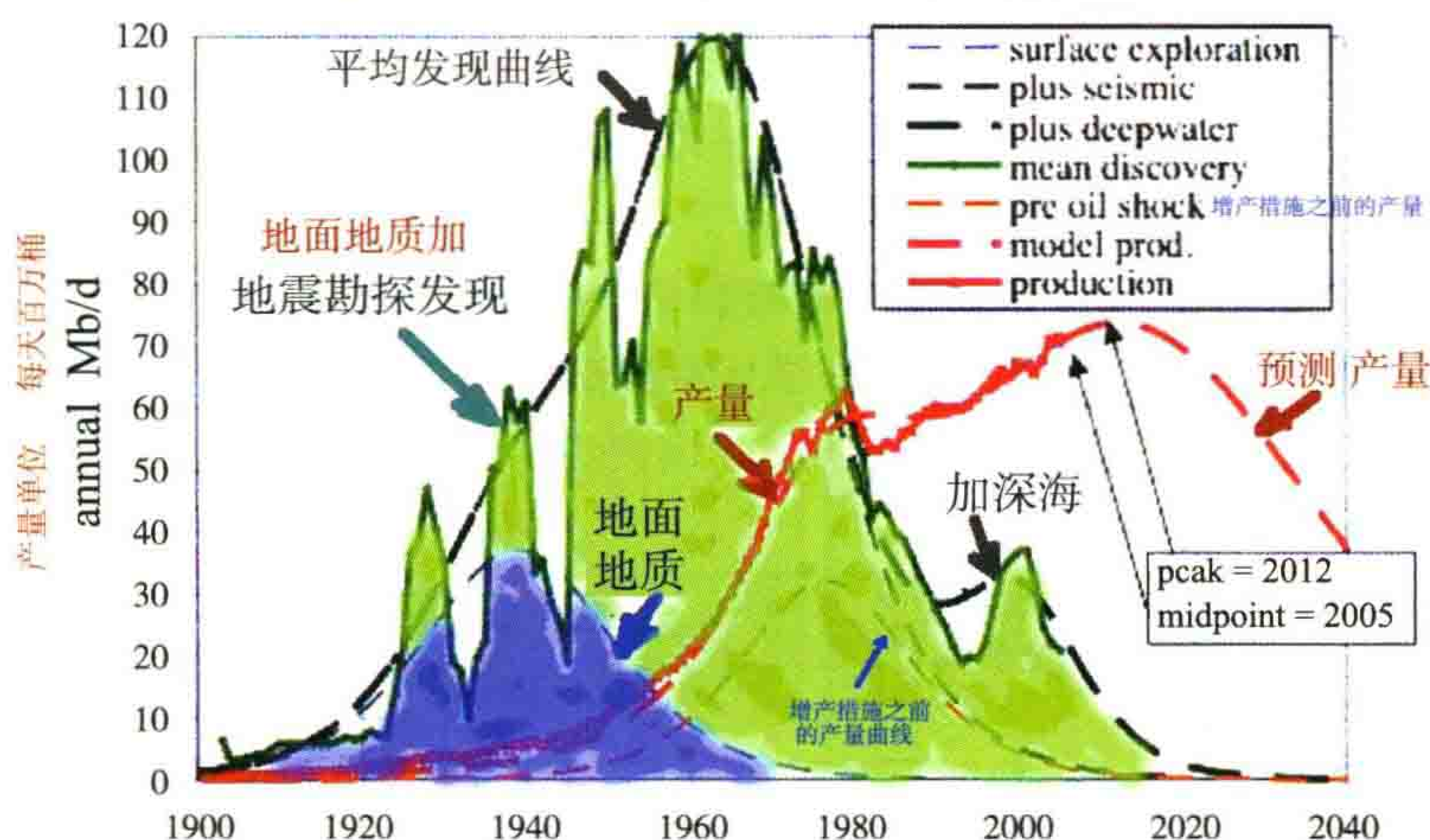


图1 世界石油历年发现量统计曲线

[根据 Laherrere(2006)资料]

图1左下方的蓝色细线代表1920

~1960 年用地面地质方法所找到的石油(涂蓝色的部分),绿色粗线代表 1940~1980 年地面地质加上地震勘探方法所找到的石油量,于是两条线之间的大部分储量(涂绿色的部分)都是靠地球物理地震方法找到的。而 2000 年前后的深海油气勘探(图右方),也探明不少储量,这也要归功于地震勘探技术的进步。从图 1 可见,依靠地球物理的地震方法所探明的储量占全球油气总储量的 2/3 以上!

在世界范围内地震勘探所起的作用如此的明显,在中国也是如此,只不过国人对此缺乏了解而已。**作为一名地球物理勘探队员,我为自己见证了 60 年来地球物理勘探事业的飞速发展过程而感到鼓舞。**

下面引用 SEG《前沿》杂志的文章中 Lawrence M. Gochioco 的一段话:

> 未来的 20 年将会怎样? 虽然作者只能谨慎地做出推测,但肯定会超出作者目前的想象。到那时作者就 66 岁了,或许已退休了。然而我知道自己选择了一项崇高的事业,从中我能够看到地球物理人员给这个世界带来的积极影响。他们不仅有利于保证全球的能源供应,而且为社会科学进步做出了扎扎实实的贡献。我们在信号处理理论方面的创新、三维成像法的改进、超级计算机及三维可视化技术,推进了医药、气象与生命科学等学科的进步。当 21 世纪勘探任务的挑战把我们带到诸如更深的海洋深度、外层空间与行星探测时,作者确信地球物理工作者定会全身心地投入到研制更先进设备的工作中去的。
>
> ——Lawrence M. Gochioco
>
> *The Leading Edge*,2002(11)

回顾过去,这 60 年来,通过物探工作者的不懈努力,我们找到了大庆油田,开拓了渤海湾断块油田的地震勘探方法,在新疆大沙漠中准确发现了油田,更在库车山区及四川盆地找到了克拉 2 和普光等大气田,并且在南海海域找到了一批油气田,使我国石油年产量多年来维持在 1.6×10^8~1.8×10^8 t,位居世界第五。对于我们中国这样复杂的地质结构,能够取得如此的成就是绝非寻常的。

这里面有物探工作者的努力,更有石油部及地矿部领导层的大力支持,中科院及高校科研单位的协同配合,才取得今天的成绩。

我国物探技术方面可以称得上世界水平的有如下几项。

(1) 山地地震勘探的成套技术,世界领先。

(2) 大沙漠采集质量的极高水平。

(3) 海滩及过渡带的成套采集装备和技术优良。

(4) 塔里木轮南、塔河海相碳酸盐油田的缝洞带识别技术极有水平。

(5) 新疆及大庆的岩性油田勘探技术及火成岩储集层地震勘探技术已初见成效。

(6) 有自主知识产权的物探软件:Grisys、GRIstation、KLSeis 及近年来推出的 GeoEast 大型地震资料处理及解释软件,都很有水平。

(7) 重磁电探测方面的三维解释也开始在国外初露头角。

这些都是让我们引以为自豪的。

展望未来,一方面我们对今后地球物理勘探技术的发展和进步充满着信心;另一方面,我想强调以下两点。

(1) 创新意识还要与求实精神结合起来。

(2) 推广新技术、新方法要从中国的实际情况出发,不要盲目地跟外国学。

目前,我们还有不少遗憾之处表现在 **7 个方面**。

一、7 点遗憾

(一) 仪器都是外国造

和我国汽车工业相似,改革开放以来,我们街上走的汽车过去绝大部分都是外国造,近年来汽车又变

成多是中外合资生产。我国的地球物理仪器制造业也走了一条艰辛的道路，西安地球物理仪器厂也走合资的路，但只是变成外国公司的装配厂，产品价格高于国外引进，于是长期陷于困境。

其实本人倒不在乎直接引进外国地震仪器，“拿来主义”也是无可非议的。但是随着BGP在全球物探行业中的地位逐年提高，2004年左右，美国西方地球物理公司首先宣布禁止向中国出卖地震处理软件，并且禁止我们在国外业务中使用他们的软件。这引起中石油领导层的担心，害怕在地震仪器方面也出现类似情况，于是总公司科技局派来人要求我们在短短两年里造出世界上一流的地震仪器。我们好不容易自己攻关造出的“现代化先进地震仪”——ES109大型地震仪(高速数据传输系统)在野外试验成功。但刚刚发布消息，2010年3月，中石油领导层又斥巨资购买了ION公司股份，又成立了INOVA合资公司。我不知这对我们国产仪器的研制和生产有何影响。

今后中国制造的先进地震仪哪一天才能立足于世界先进行列?

(二)对MEMS数字检波器跟着忽悠

ION公司花巨资研制了VECTOSEIS MEMS数字检波器(图2、图3、图4为这种检波器的外观及特性示意图)，宣称开创了数字地震的革命，大造舆论，认为是“全数字时代来临了”。“数字地震仪器的动态范围是110 dB，而常规的模拟检波器的动态范围只有60 dB”，因此发展MEMS数字检波器便成为“数字革命的瓶颈”。对此，我在多年前就提出了异议。



图2　VECTOSEIS MEMS数字检波器

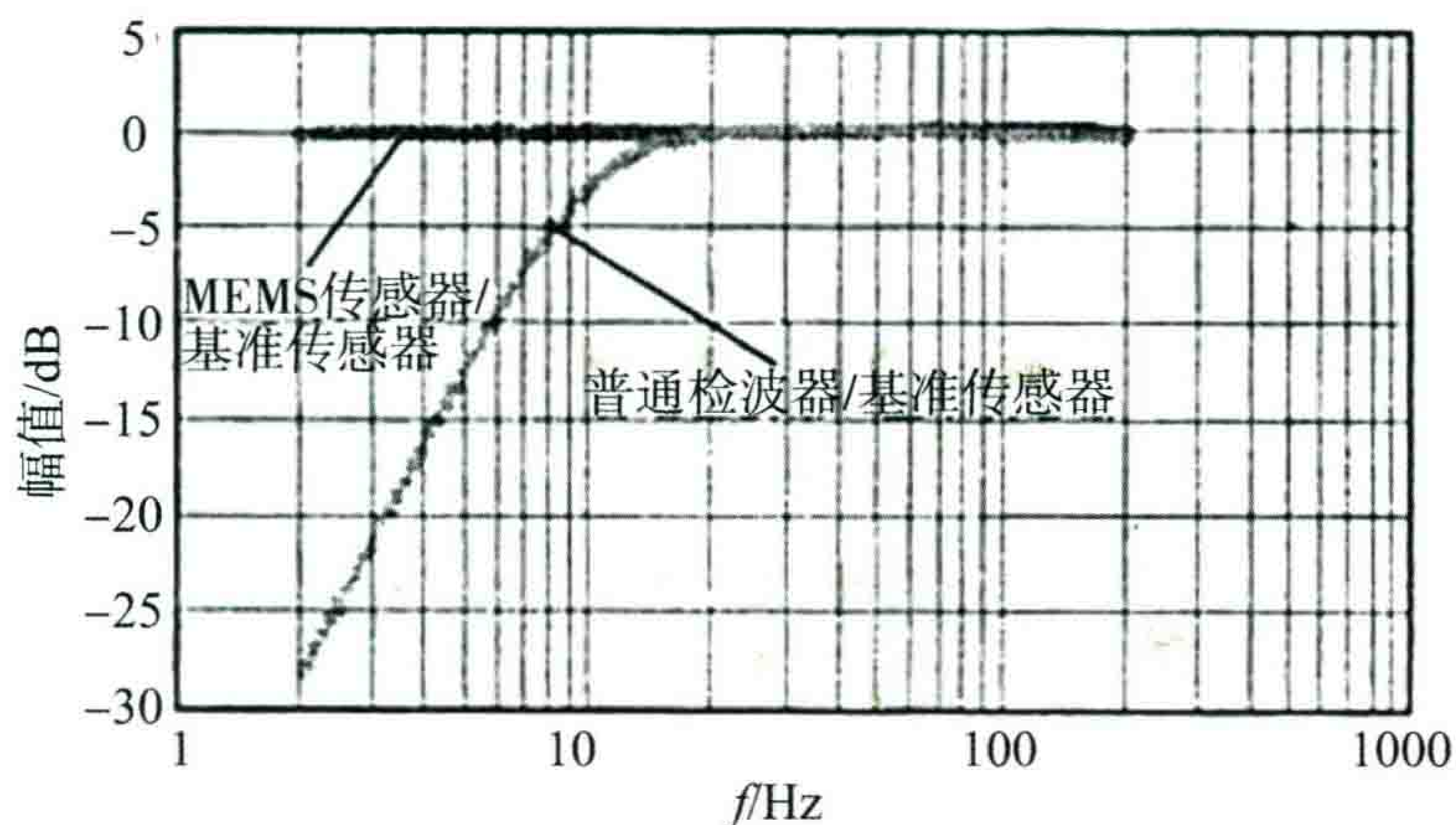


图3　数字检波器与普通检波器幅频曲线特性对比

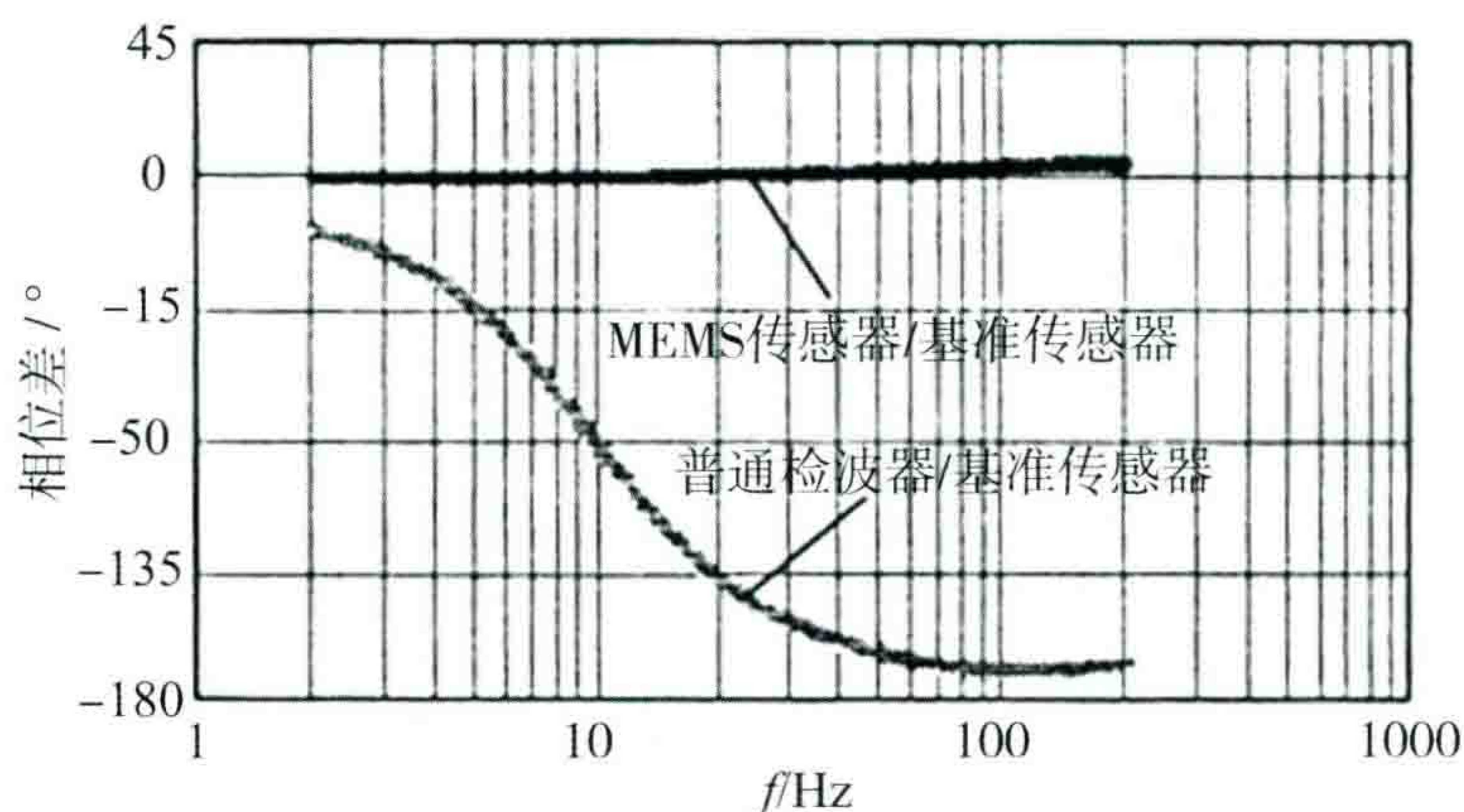


图 4　数字检波器与普通检波器相位—频率曲线特性对比

目前，大多数人帮着忽悠，都说 MEMS 数字检波器多好！频谱宽，畸变小，噪声小。

这几年试验对比的答案是客观效果是“数字检波器与模拟检波器”剖面效果是一样的！

SERCEL 的技术负责人也承认：“中频段数字检波器与模拟检波器效果基本一样”（而对石油勘探，只能争取到中频，我们现在的剖面上主频还没有超过 70 Hz）。

我早就提出，检波器插在地上，谐波畸变大得惊人，追求 0.001 指标没有实际意义。仪器制造商说：数字化的瓶颈在检波器。我说：实际上真正瓶颈在地表。地表土壤是一个最糟糕的弹性介质，非线性畸变最大，陆上施工又无法避开它，于是陆上数字检波器不能发挥应有的作用。

在大家一片对“全数字”地震勘探的赞扬声中，我要负责任地声明：“MEMS 数字检波器的优点插到地里就没有了”。它是鲜花，但却是“一朵鲜花插在牛粪上”。比普通检波器贵 50 倍的 MEMS 数字检波器 VectorSeis “它好听，但效果和普通检波器基本一样”（图 5 为检波器的耦合谐振现象示意图）。

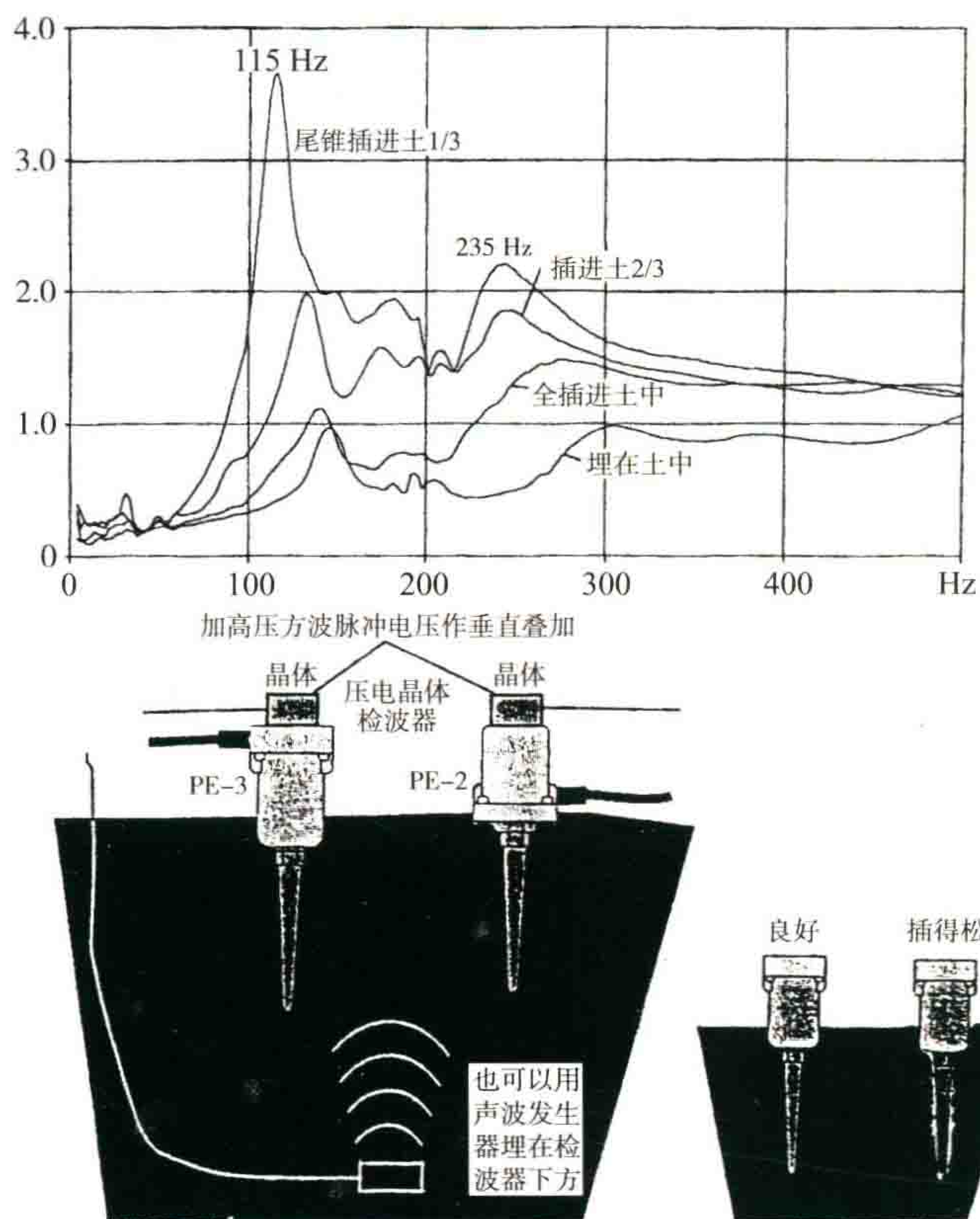


图 5　检波器耦合谐振现象示意图

我认为，不同的检波器接收的剖面效果基本是一样的。

2008 年，SEG 拉斯维加斯年会上 Glenn Hauer 发表的加拿大试验报告也证实了我们的判断。他们的结论是数字检波器与模拟检波器“Virtually Identical”。

MEMS 数字检波器还有显著缺点：① 它不能搞组合；② 与地耦合不良时，高频微震增强，不利于高分辨率勘探。

对陆上施工，人们还不能忘记以下几个事实。

(1) 野外作业时，相邻炮的反射能量往往可以差 2～10 倍，主频胖瘦可以差 1 倍，相位谱更弄不清。

(2) 插在棉花地里和水稻田里的地震接收子波的频谱也各道不尽相同，那么，你过度地追求检波器的灵敏度一致及相位特性的高指标有没有实际意义？有人要问了，为什么我们最终的地震资料不错呢？我的回答是资料处理中各种反褶积帮了我们的忙。我们反射资料的改进，多半要归功于处理模块的强大功能。脉冲反褶积、预测反褶积、气枪反褶积、仪器反褶积基本上解决了野外资料的缺陷，地表一致性反褶积(或两步法)可以纠正不同激发、接收中的能量差别以及频谱差别，包括相位差别。

所以我强调，**反褶积功不可没！**

不要迷信数字检波器，不同检波器所得的地震记录，其效果是一样的。由于我们地震仪器(包括检波器)的技术指标已经大大高过了施工环境的要求指标。所以，当前记录的好坏并不决定于仪器及检波器的技术指标高低，而是取决于：① 工区的地震地质困难程度；② 施工者是否正确操作；③ 施工设计的方法是否对路。

再好的仪器，放到困难的工区去施工，照样得到坏记录。再好的检波器，如果埋置不好，也不会获得好的高频有效反射记录。

华北地区的实践证明：我们在华北地区把单个数字检波器与单个模拟检波器在野外并排拉开，做了一条测线的严格试验对比(据张汝杰资料)。

单炮原始记录上数字检波器的高频成分比模拟检波器丰富，因为它是加速度型检波器。但是结果如下。

(1) 原始单炮记录的频率扫描结果：低频及中频频档上二者一样，高频档上数字检波器有时还不如模拟检波器(图 6～图 9)。

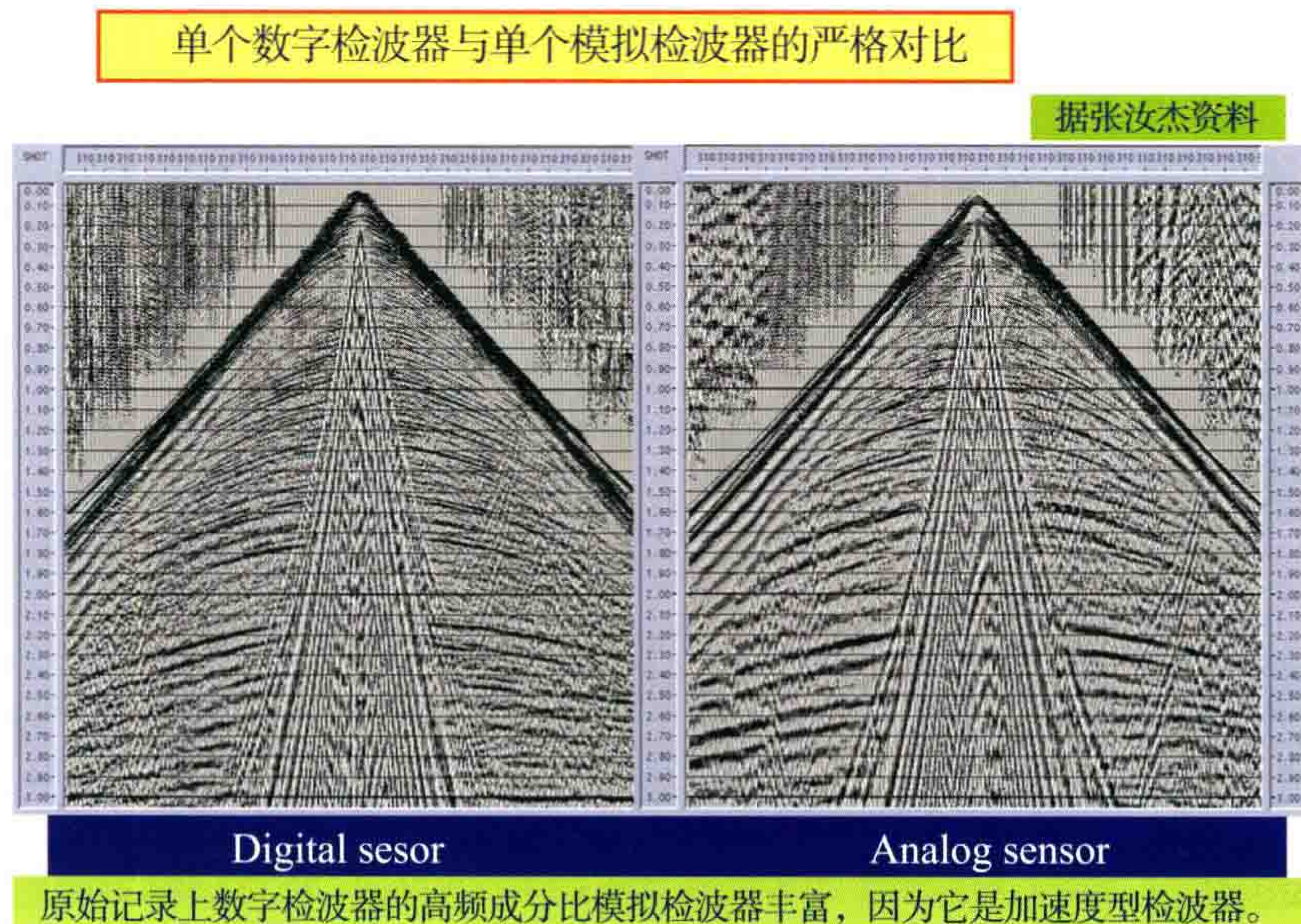


图 6　数字检波器与模拟检波器记录分频对比图(1)

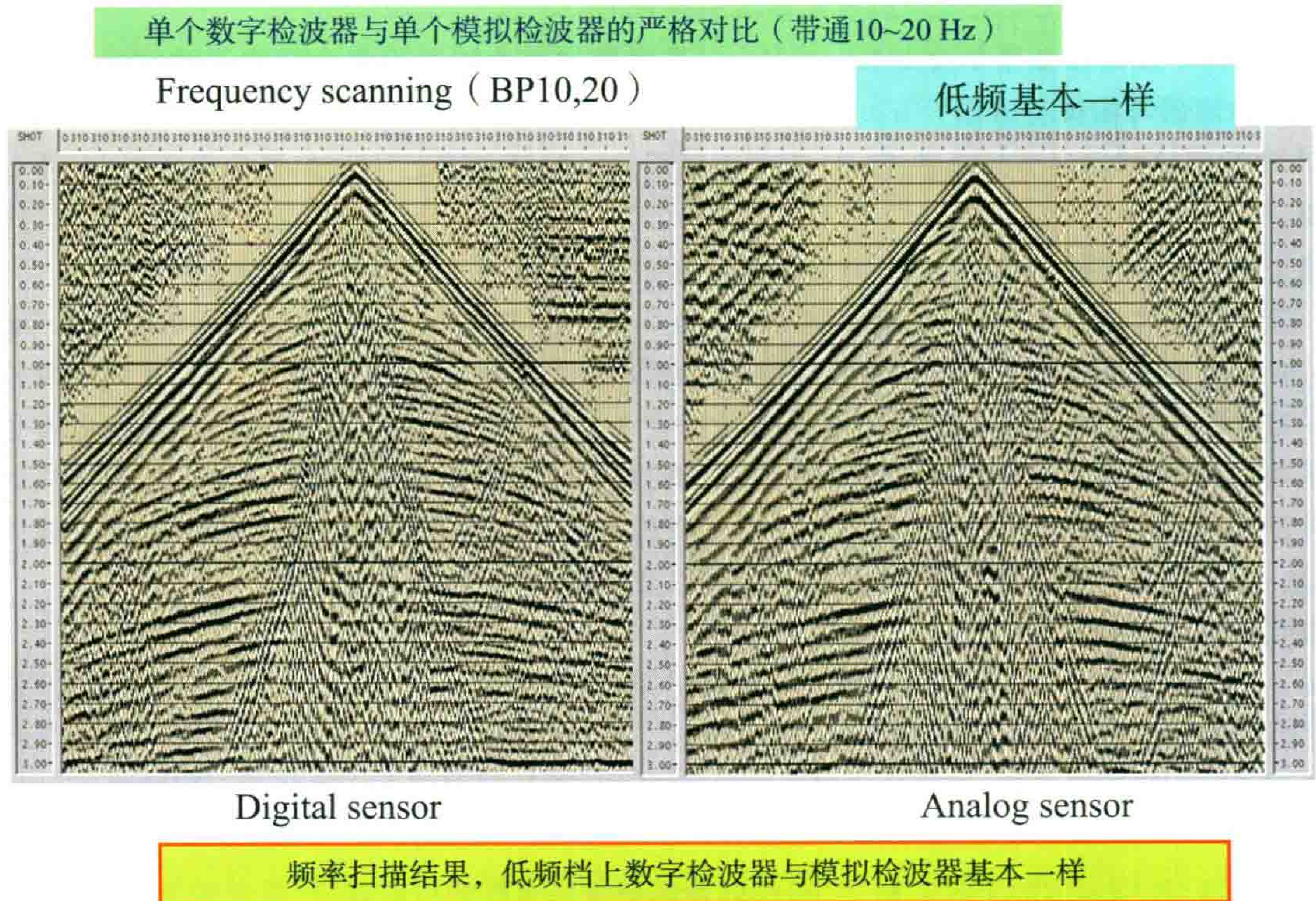


图 7　数字检波器与模拟检波器记录分频对比图(2)

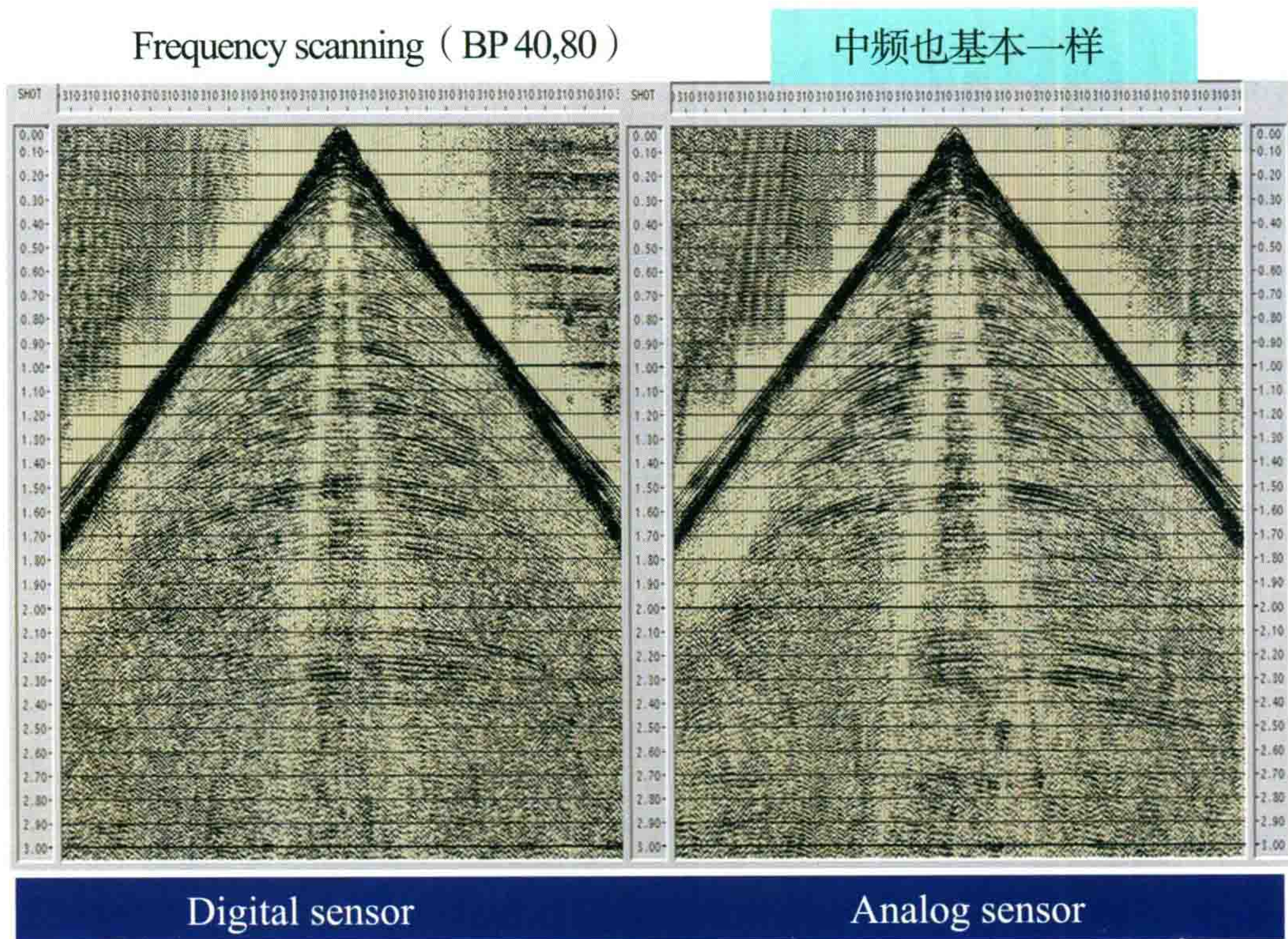


图 8　数字检波器与模拟检波器记录分频对比图(3)

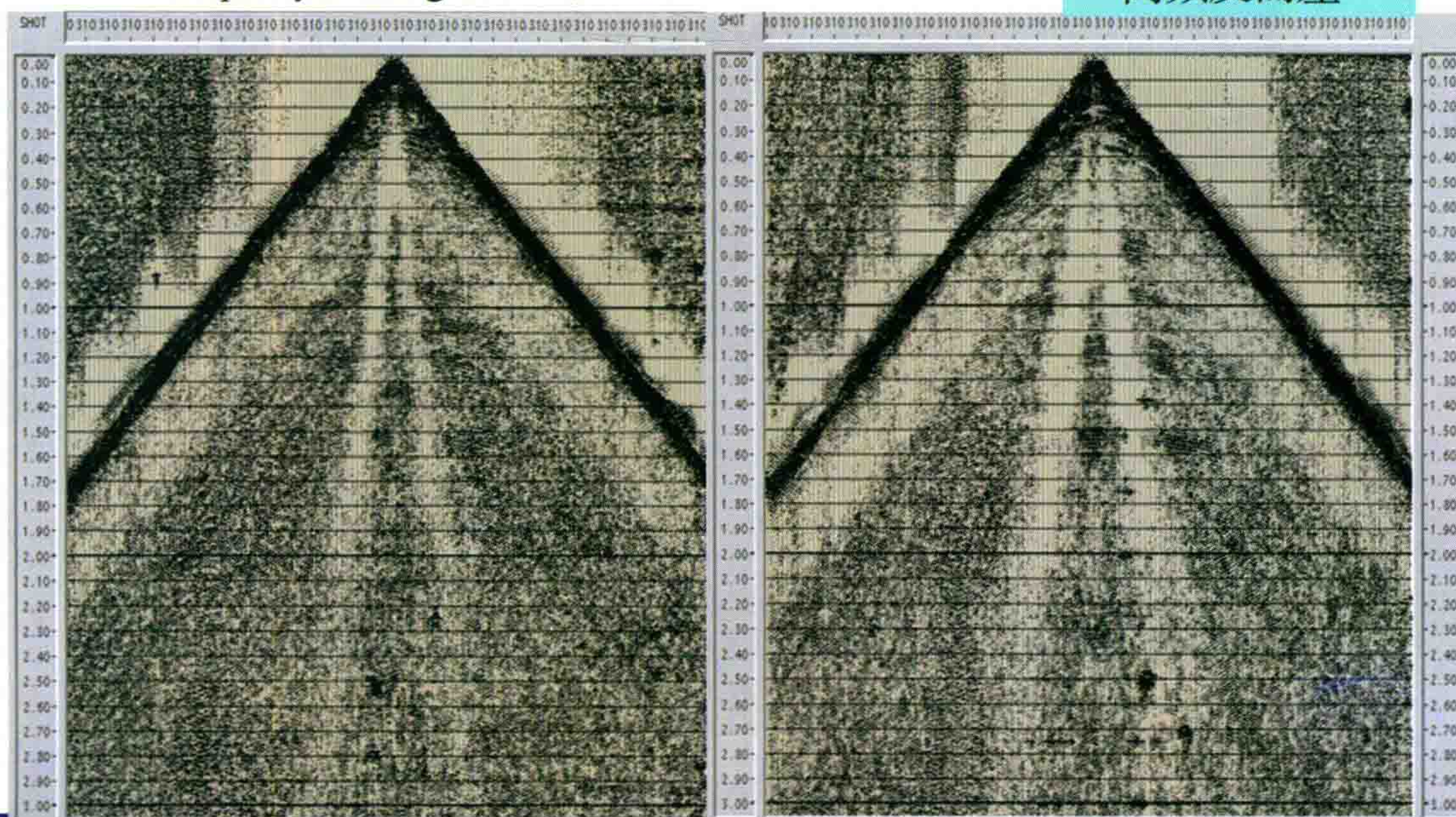


图 9　数字检波器与模拟检波器记录分频对比图(4)

(2) 水平叠加剖面的效果对比：反褶积前，数字检波器比模拟检波器主频偏高(图 10)。反褶积后，二者几乎完全一致(图 11)。



图 10　数字检波器与模拟检波器反褶积前水平叠加剖面对比

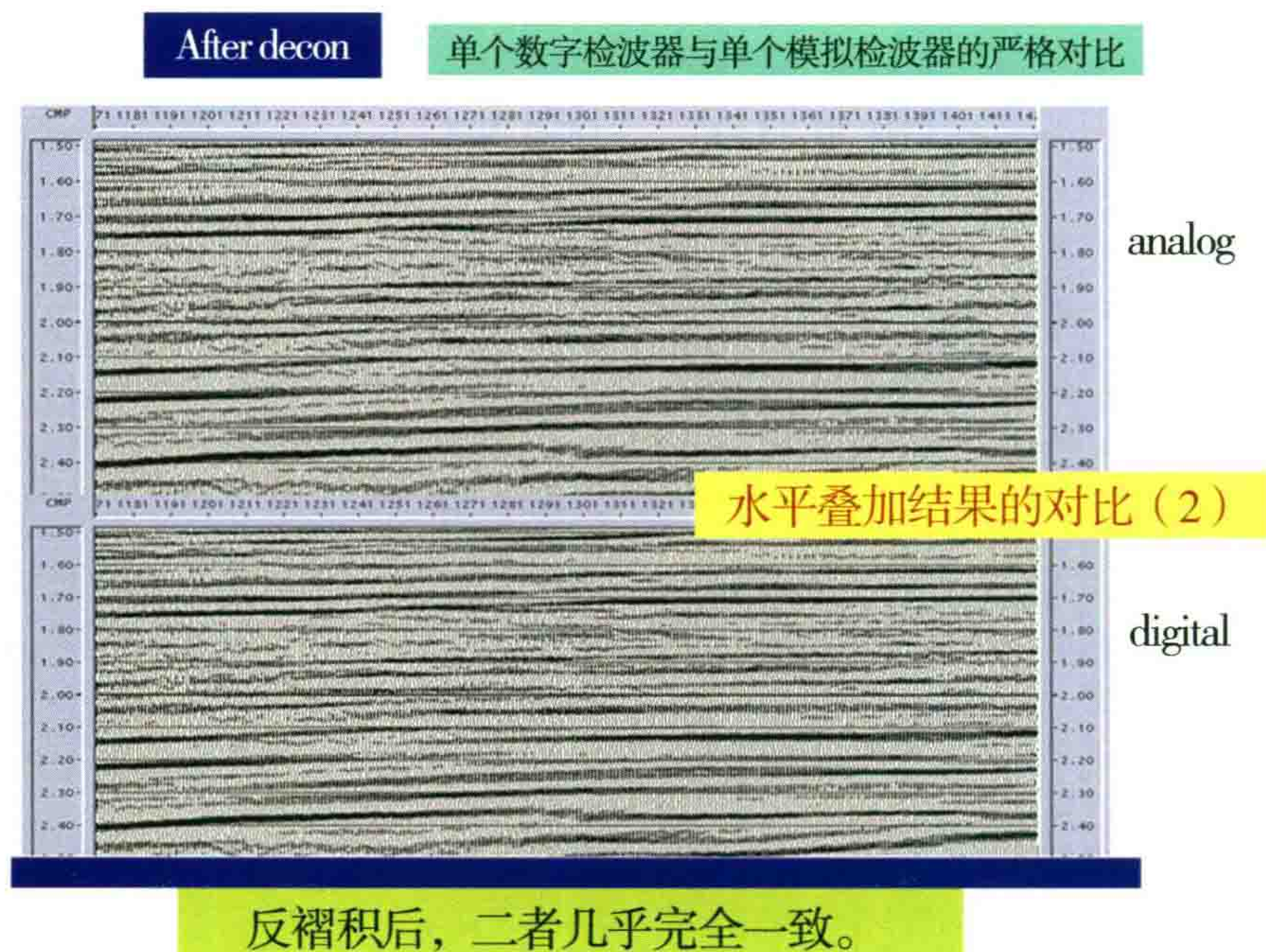


图 11 数字检波器与模拟检波器反褶积后水平叠加剖面对比

1. 判断好坏的标准

很多人在做数字与模拟两种检波器性能对比时，喜欢采用记录道的振幅谱作为依据。从振幅谱看来，数字检波器的频谱的确比模拟的要宽，从此就下结论，认为数字检波器所获得的记录比模拟的要好。我认为这个结论是值得怀疑的，我们不能光看一维频谱分析，高频端信噪比不够的宽频是没有用的。

首先因为普通检波器是速度型的，而数字检波器则是加速度型的，它们的频谱是一个微分关系，数字检波器的频谱振幅随频率而线性增高，当然在原始记录上的频谱高频部位就会相对的被抬高。所以，原始记录的频谱宽窄不是判断记录好坏的关键，也不是说明检波器好坏的实质问题。

最近我的学生魏继东同志做了试验：在同一点上，数字检波器所得的记录，经积分后，与模拟检波器所得记录基本一样（图 12）；而模拟检波器所得的记录，经微分后，又基本与数字检波器记录一样（图 13）。

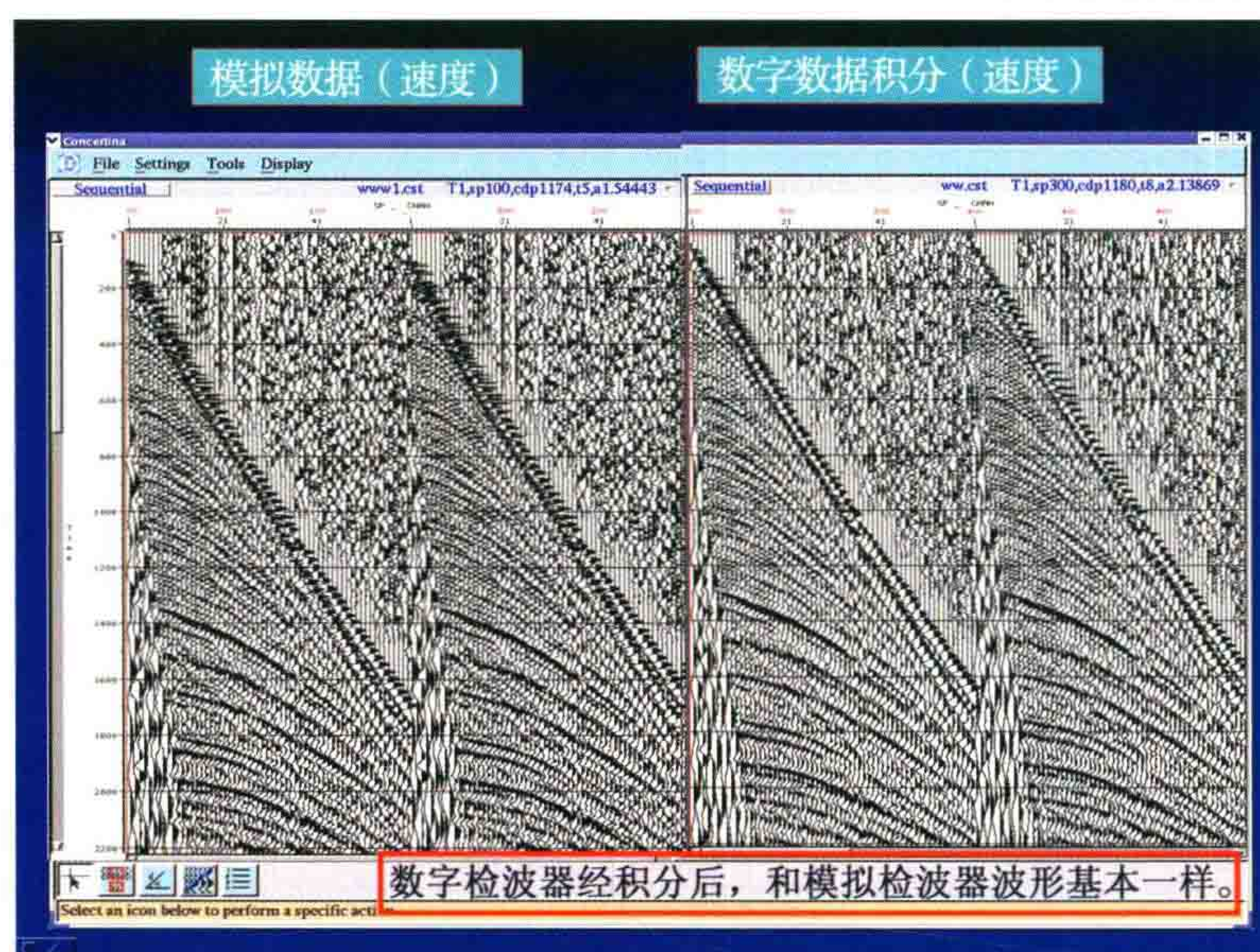


图 12 数字检波器记录经积分后和模拟检波器记录对比

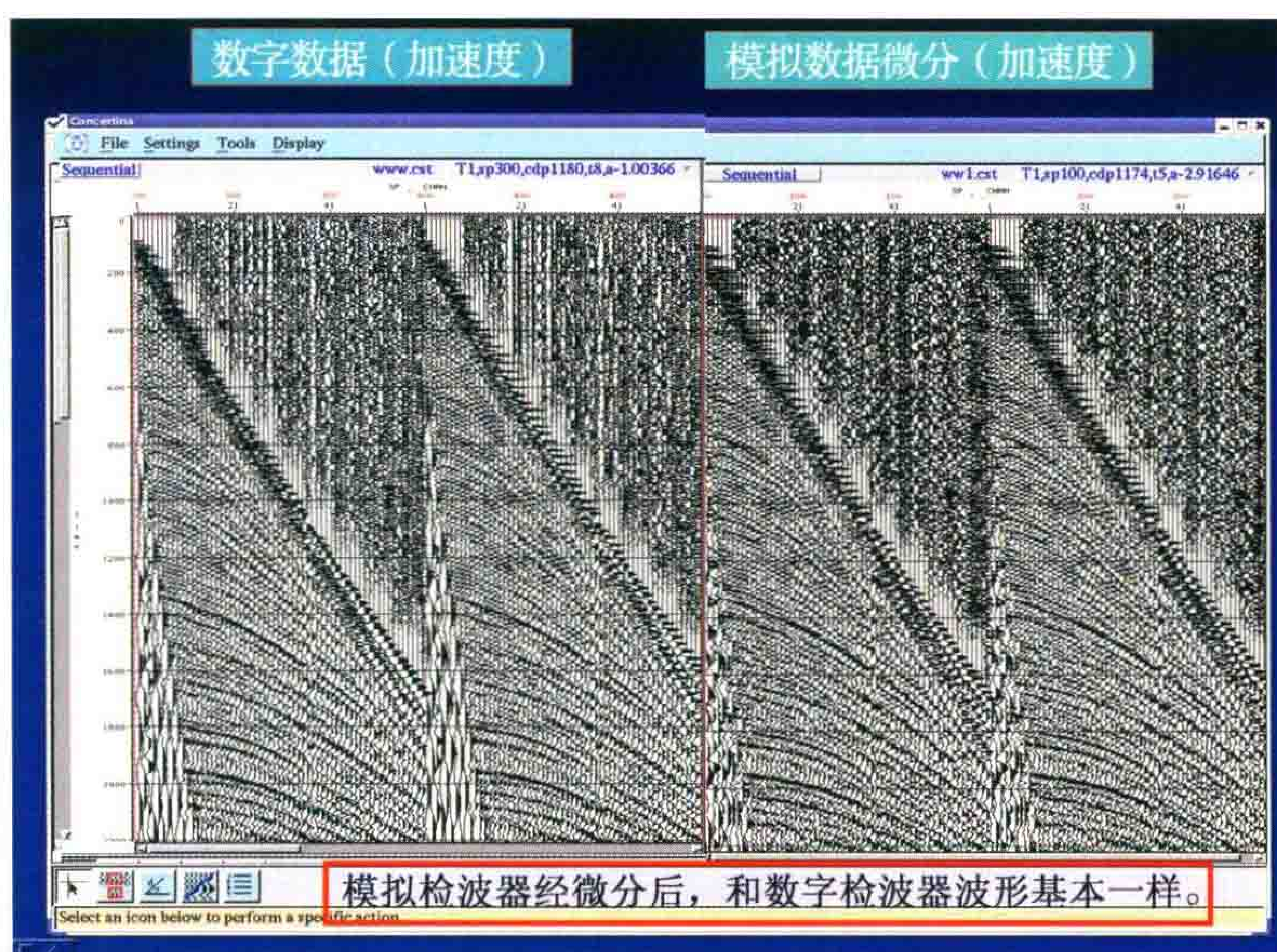


图 13 数字检波器记录和模拟检波器经微分后的记录对比

2. "分频扫描"才是判断记录好坏的唯一标准

我认为真正判断记录的好坏，不能光看记录的振幅谱，而要通过"分频扫描"，来检查记录中信噪比大于 1 的"有效频宽"的范围有多大，这才是判断记录好坏的唯一标准。这一标准是我首先提出来的，在国内近日已经被大家接受。**可惜在国外还没有人这样认识问题**。

什么是好仪器，什么是好记录，还没有正确的统一认识。分频扫描的重要性还要达成共识。

我有责任把真实情况告诉大家，使大家不要走弯路，不要盲目跟着外国人走，将来后悔莫及。

什么时候才能普及数字检波器？什么时候才能单点接收？我看要等到数字检波器的售价（**现在三分量单价 1000 多美元，单分量 500 多美元，折合人民币约 7000 元和 3500 元**）和模拟检波器（现在单价 50～80 元）接近时，才有可能。

（三）单点接收不看实际效果

数字检波器不能搞组合，于是刮起了"单点接收"的一阵风。掀起了一股"单点接收"的浪潮，我们有人以为是个新技术，用大量增加覆盖次数来弥补不组合的缺陷。搞得采集成本成倍增加，野外记录品质明显下降。在国外，他们是采用加强可控震源的组合来弥补检波器不组合的缺陷，情况稍好。但是我认为"单点接收"不组合总不是好事。

组合效应压制高频信号的计算夸大了组合的缺点。其实 25 m 左右的组合跨距并不会压制掉 150 Hz 的信号。不要一味反对组合，不要忘了组合还有提高信噪比的作用。例如，用 24 个检波器组合能压制高频随机噪声约 5 倍。组合作用即使把某个高频信号压制到 0.5 倍，信噪比还是增加了 2.5 倍！**所以，对组合的功与过要全面从高频端的信噪比谱的改善来衡量。现在还不是取消组合效应的时候，10 m 左右跨距的小面积组合总是有好处的。**

组合效应是压制了部分高频信号，但对于 1 s 到达的 100 Hz 高频有效波，大地对高频的吸收量比组合的衰减量强 500 倍！它们两种效应是联合起作用的，综合考虑时，组合起的作用是极有限的。参看我 2007 年发表的《高密度采集中组合效应对高频截止频率的影响》一文。

用"单点接收"提高分辨率的呼声是数字检波器不能搞组合缺点所兴起的**一种"概念炒作"**。单点接收的目的是为了减少组合效应，提高分辨率。如果信噪比都不存在了，谈什么分辨率？我已经证明，当原始信噪比低于 1/2 时，去噪后会出现假信号，呈现假剖面。

（四）高密度采集找错了斗争对象

当前我们陆上平原地区改进地震记录品质的方向是什么？什么是主要矛盾？

其实面波不是主要敌人，高密度采集找错了斗争对象。大地高频吸收衰减才是主要矛盾，高频噪声才是主要障碍。但是我们不少人却跟着外国人搞“高密度采集”，勘探成本大量增加。

当前高密度采集主要在海上取得较明显的效果。因为过去海上电缆中每米就有一个水听器，只是由于地震仪器没有那么多道，所以在电缆中采用了 10～20 m 组合后再接收。现在仪器的带道能力大大加强了，当然“水到渠成”“顺理成章”地采用了高密度采集。这样，基本不增加施工成本，而且会见到明显的成效，应该大力提倡。可控震源的高密度采集也是合理的。

然而，陆上搞高密度采集却需要成倍地增加检波器及增加施工工作量，并且它对高频扩展的潜力是极有限的。我做过理论分析，参看我 2007 年发表的《高密度采集中组合效应对高频截止频率的影响》一文。

高密度采集我不反对，但是要考虑经济代价。

原先对高密度采集的宣传着眼于防止面波产生的假频上，其实避免面波假频不是很重要，因为地震资料处理中与点距假频有关系的计算模块只有 *F-K* 去噪与偏移归位两个。

压制面波该用什么方法？

“3DFKK 子集圆锥形去噪”被有些人吹得神乎其神，其实它不是个好方法。压制面波为什么非要用 *F-K* 去噪？用 DEGROR 很好，它也与假频无关。

随机噪声的视波长只有 1～2 m，传播速度只有 120～200 m/s **——外国人还不知道。**

20 世纪 60 年代，我在 6 m 小排列上发现，低速次生干扰波是普遍存在的。道距 0.5 m 的小排列上随机噪声并不随机！最近克拉玛依 3-D 资料也证实了这种干扰是普遍存在的，它是我们得到高分辨率的敌人。

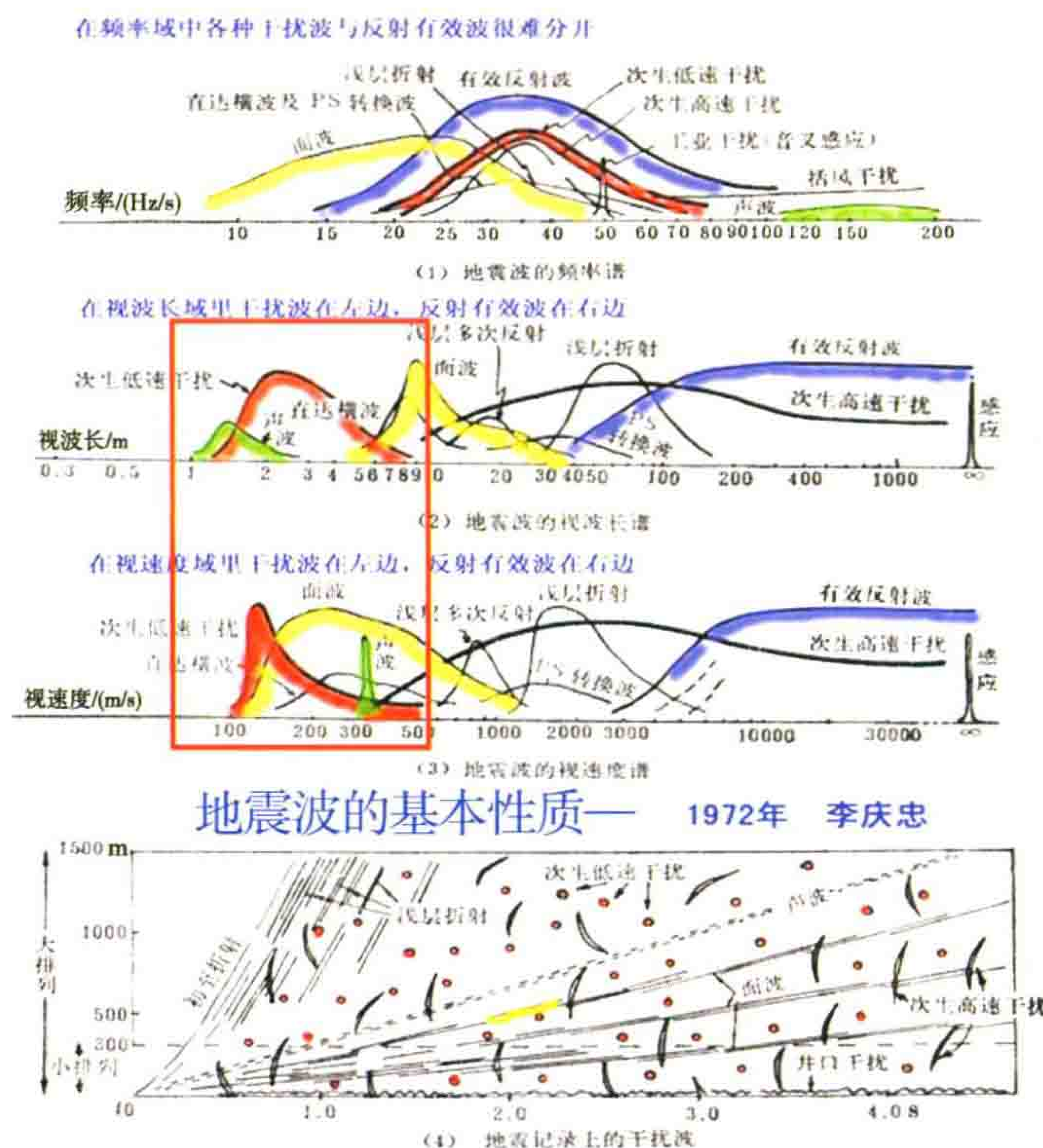


图 14　1974 年我总结出的各种干扰波与反射波在 4 个域里的分布规律图

［参考《地震波的基本性质——复杂断块区的反射波异常波与干扰波》，《石油地球物理期刊》，1974(1-2)］

图 14、图 15 和图 16 为 1972 年我对次生低速及高速干扰波的调查，以及总结出的各种干扰波与反射波在 4 个域里的分布规律图件[参考《地震波的基本性质——复杂断块区的反射波异常波与干扰波》,《石油地球物理勘探》,1974(1-2)];图 17 为 1998 年我对直达横波干扰的三分量调查图件[参考《高频噪声的三分量测定》,《石油物探》,1998,37(1)];图 18 为东方公司北疆经理部在某技术总结报告中的关于油田区地震干扰分析的图件。可以看到次生高速干扰和次生低速干扰几乎布满整张记录，根本无法完全避开。

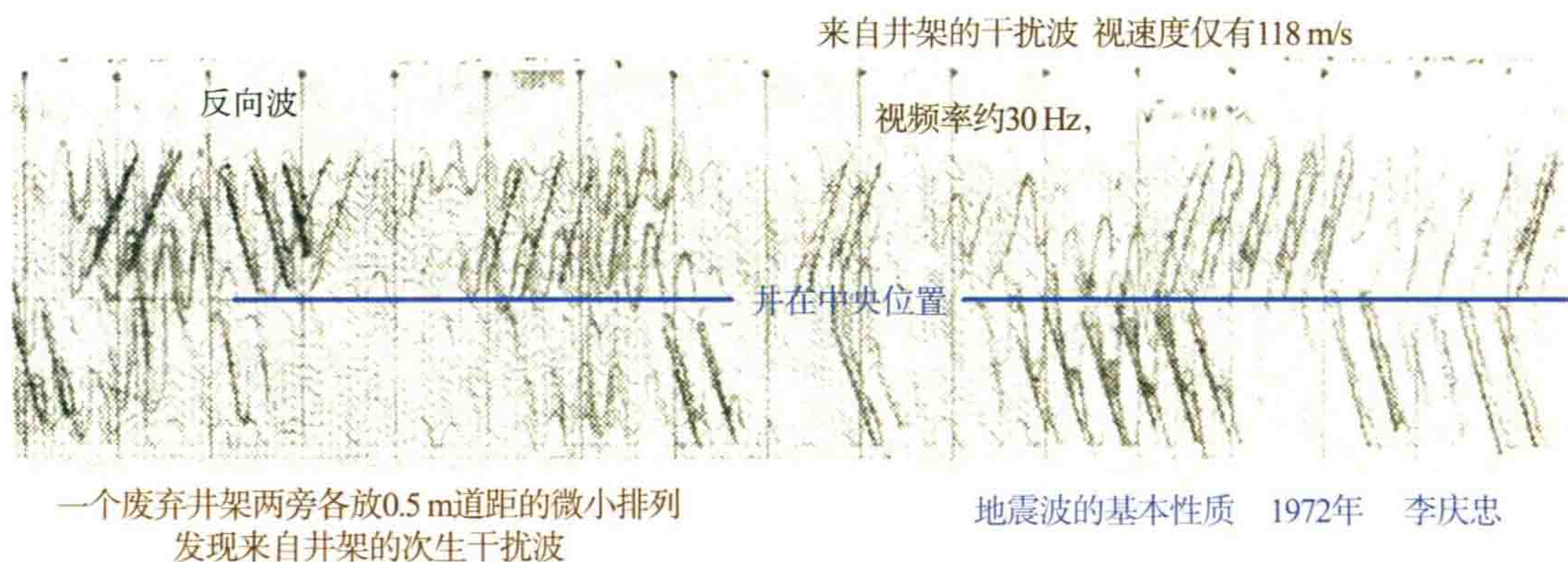


图 15　1972 年我对次生低速及高速干扰波的调查图 1

[参考《地震波的基本性质——复杂断块区的反射波异常波与干扰波》,《石油地球物理期刊》,1974(1-2)]

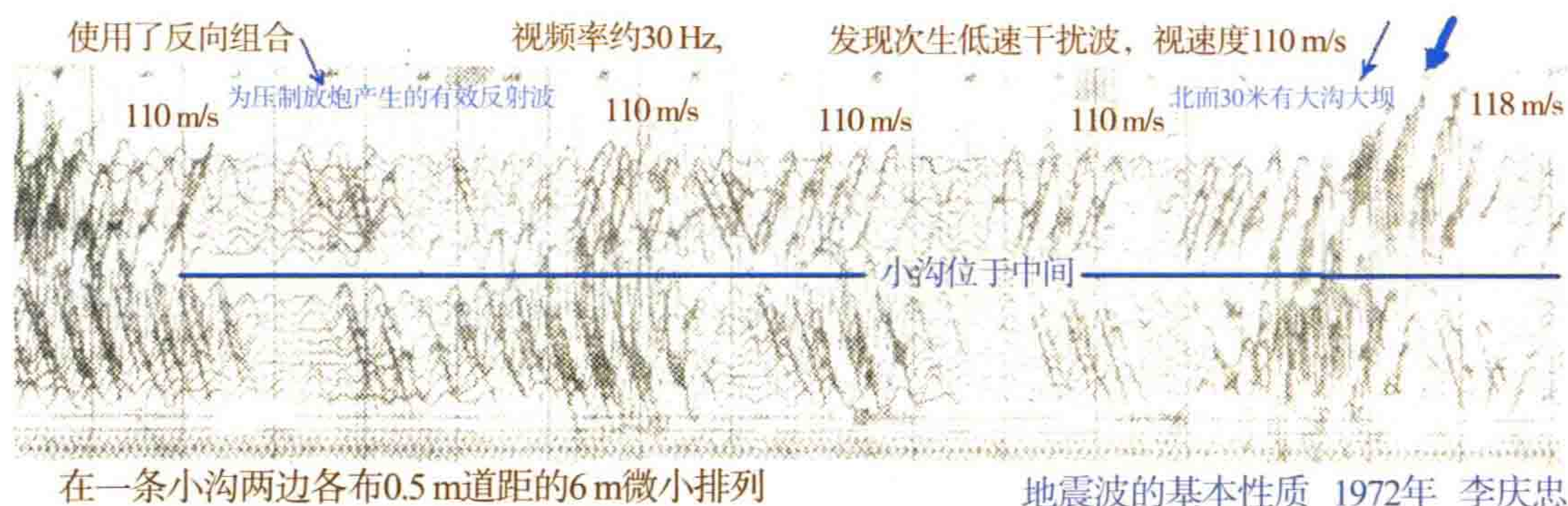


图 16　1972 年我对次生低速及高速干扰波的调查图 2

[参考《地震波的基本性质——复杂断块区的反射波异常波与干扰波》,《石油地球物理期刊》,1974(1-2)]

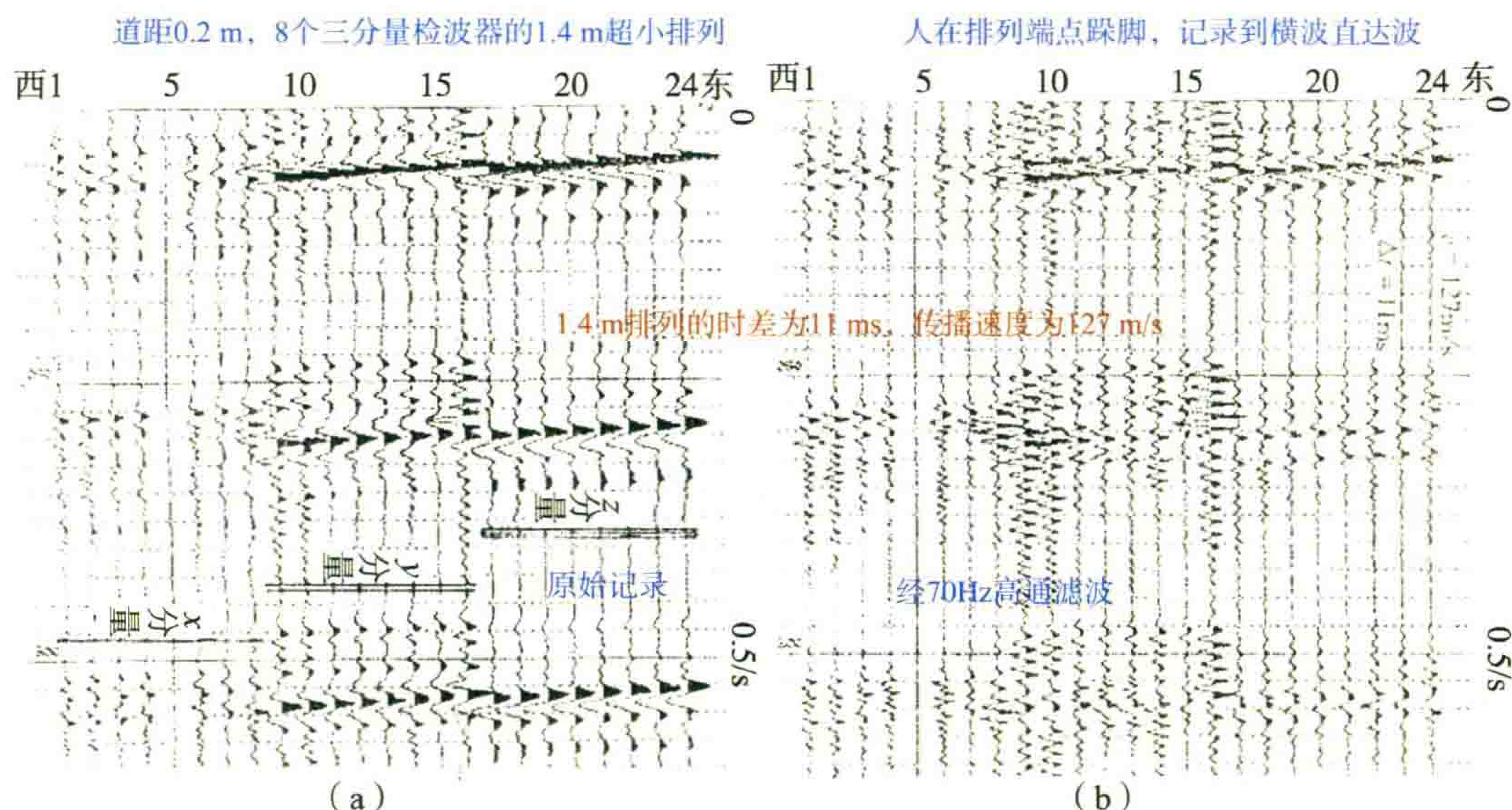


图 17　1998 年我对直达横波干扰的三分量调查

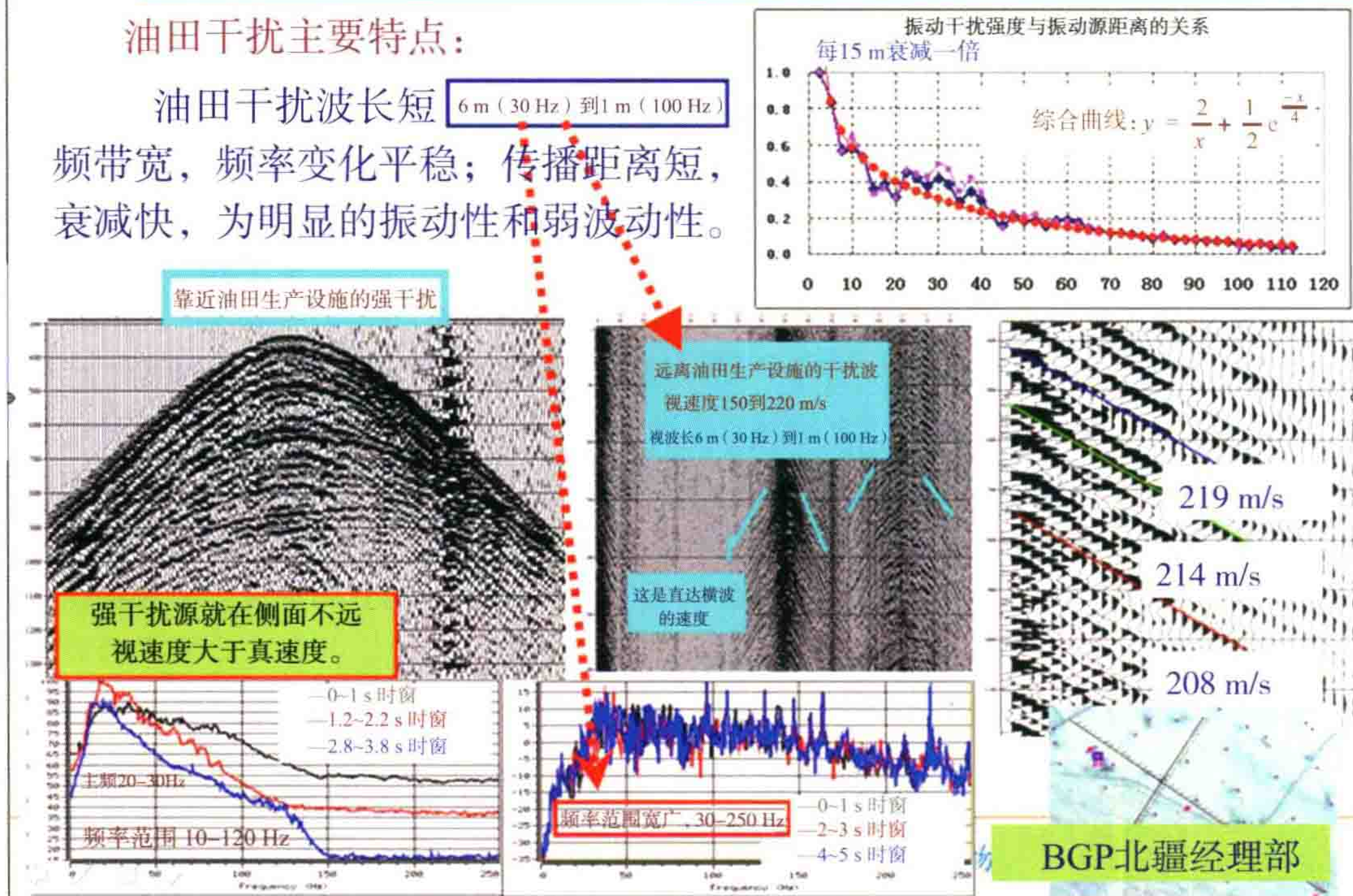


图 18　克拉玛依油田区干扰波主要特点

因此，克服高频随机噪声才是我们提高记录品质的主要方向。高频随机噪声的视波长还不到 1 m，真要防止高频噪声产生假频，点距应该是 0.2 m，显然这不能依靠提高采集密度来解决问题。

今后解决采集质量的出路

通过我们分频扫描的经验，几乎任何陆上地震资料都可以看到，当扫描频率高时，信噪比降低，随机干扰占据了主要地位，说明高频随机噪声是我们获得好的高分辨率的主要障碍。

那么克服高频随机噪声应是我们陆上提高记录品质的主要方向。因此今后的出路首先应从研究改进检波器的埋置条件（埋置好坏可以使高频随机噪声大小差一个数量级），以及加强小面积组合来解决（跨距 5～10 m）。而当今物探主流思潮却是与此背道而驰了。

最近传来数字检波器效果不理想，已经积压在仓库，卖不出去的消息。又传来 Q-Land 在科威特的地质效果不明显，阿联酋再次向国际招标要重作三维地震。许多物探公司正在想出新办法。

Western 和 CGG 公司先后提出将采用 8 万～12 万道地震仪器施工，采用可控震源，数字检波器单点接收，采用很小的面元，极高的覆盖次数。

看来为了做好这世界上第二大油田，可采储量达 100×10^8 t 的大布尔干油田（Greater Burgan）的二次三维地震是值得大动干戈的，也的确可能创造奇迹，为地震勘探的历史上涂抹重重的一层油彩。

他们将采用极大程度地增加覆盖次数来争取获得好的地震资料。如果过去覆盖次数是 100 次，现在提高到 2500 次，那么按根号 N 的规律来推算，信噪比可以从 10 倍提高到 50 倍，高频随机干扰也可得到相应的压制，所以说它可能成功，但是它付出的代价太大了。

如果取得成功，我还要说：这并不是数字检波器的功劳（模拟检波器效果也会一样），更不是单点接收技术的功劳（组合后会更好），也不是高密度采集技术的功劳（因为密度高到一定程度后，对成像质量并不起作用）。而主要是用成倍地增加覆盖次数来克服高频随机干扰，以争取获得好的地震资料。

阿拉伯石油富豪们在沙漠边上填海，造出了棕榈岛；用令人瞠目结舌的奇迹般的建筑，竖起了迪拜城。

现在他们恐怕要在地震勘探的历史上再创奇迹了。

另一方面，从成像质量方面来看，陆上资料高密度采集的效果也并非像人们宣传的那样。图 19 是严格地从同一个数据体，抽成 5 m 及 25 m CDP 点距的叠前时间偏移的对比。由图可见，5 m 网格的浅层资料有所改进，其他没有多大变化。

高密度采集要适度，弄不好就浪费了工作量。例如，2003 年，油泉子地区攻关剖面 10 m 道距的高密度采集资料，当时资料有所改进(图 20)，归功于高密度采集。我们把同一资料抽稀成 20 m，丢掉一倍的数据量，结果剖面质量效果 20 m 和 10 m 的没有差别。这才发现主要是因为道距小到 10 m 后，检波器小线只能横向拉开，L_y=110 m 所产生的好效果，并非高密度采集的功劳，反倒证明了横向拉开组合的重要性。

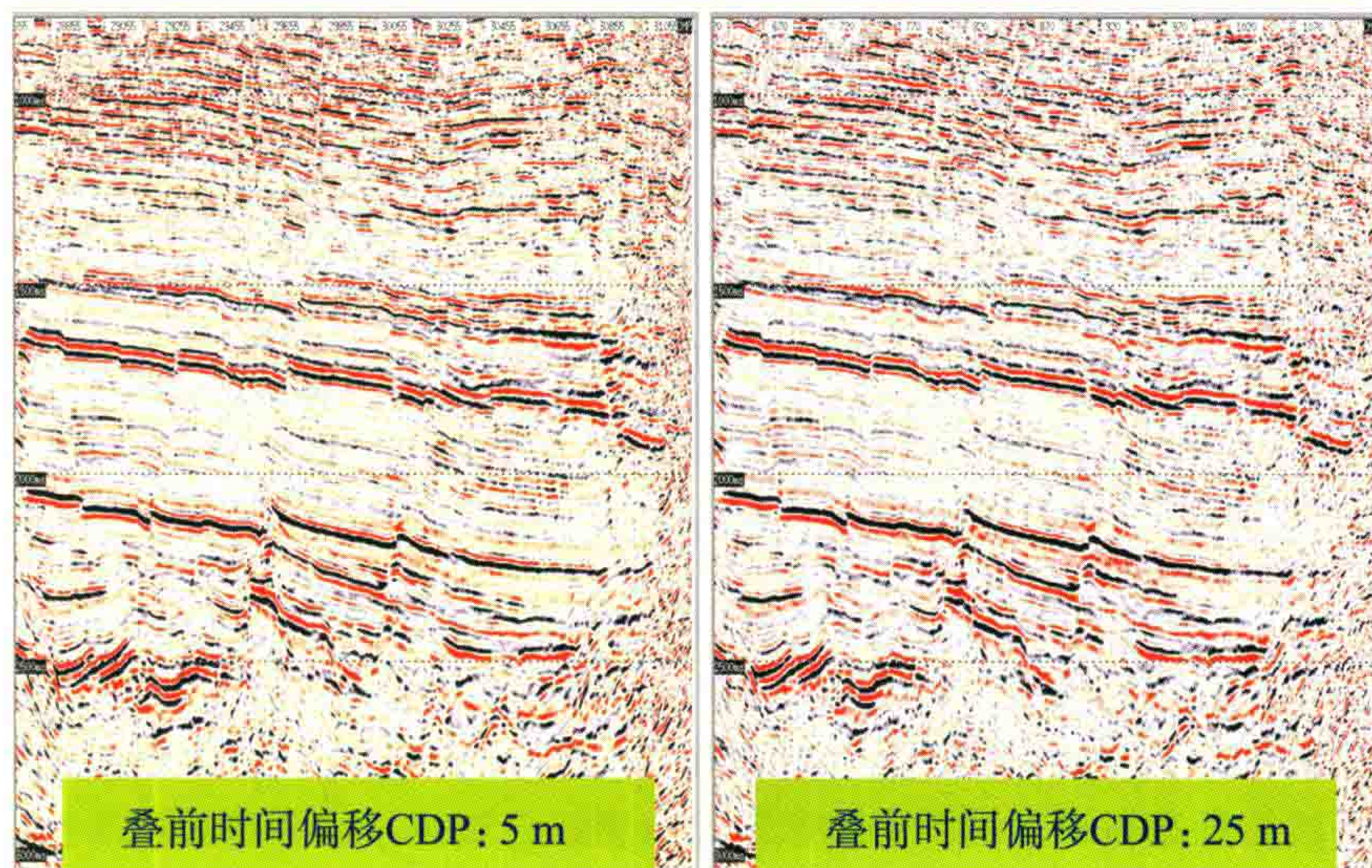


图 19 东部某地区不同道密度叠前时间偏移剖面对比

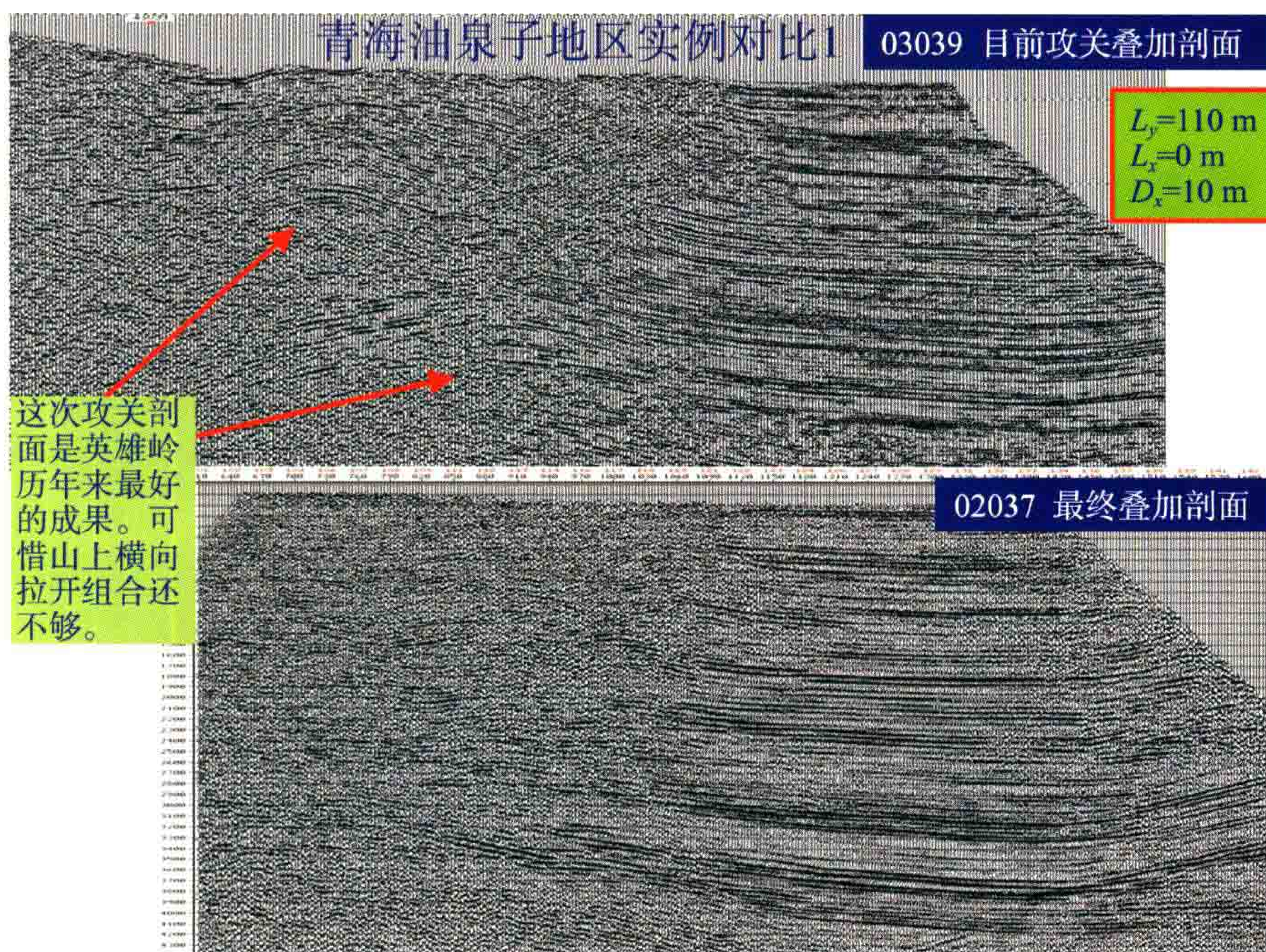


图 20 青海油泉子小道距攻关效果对比(1)

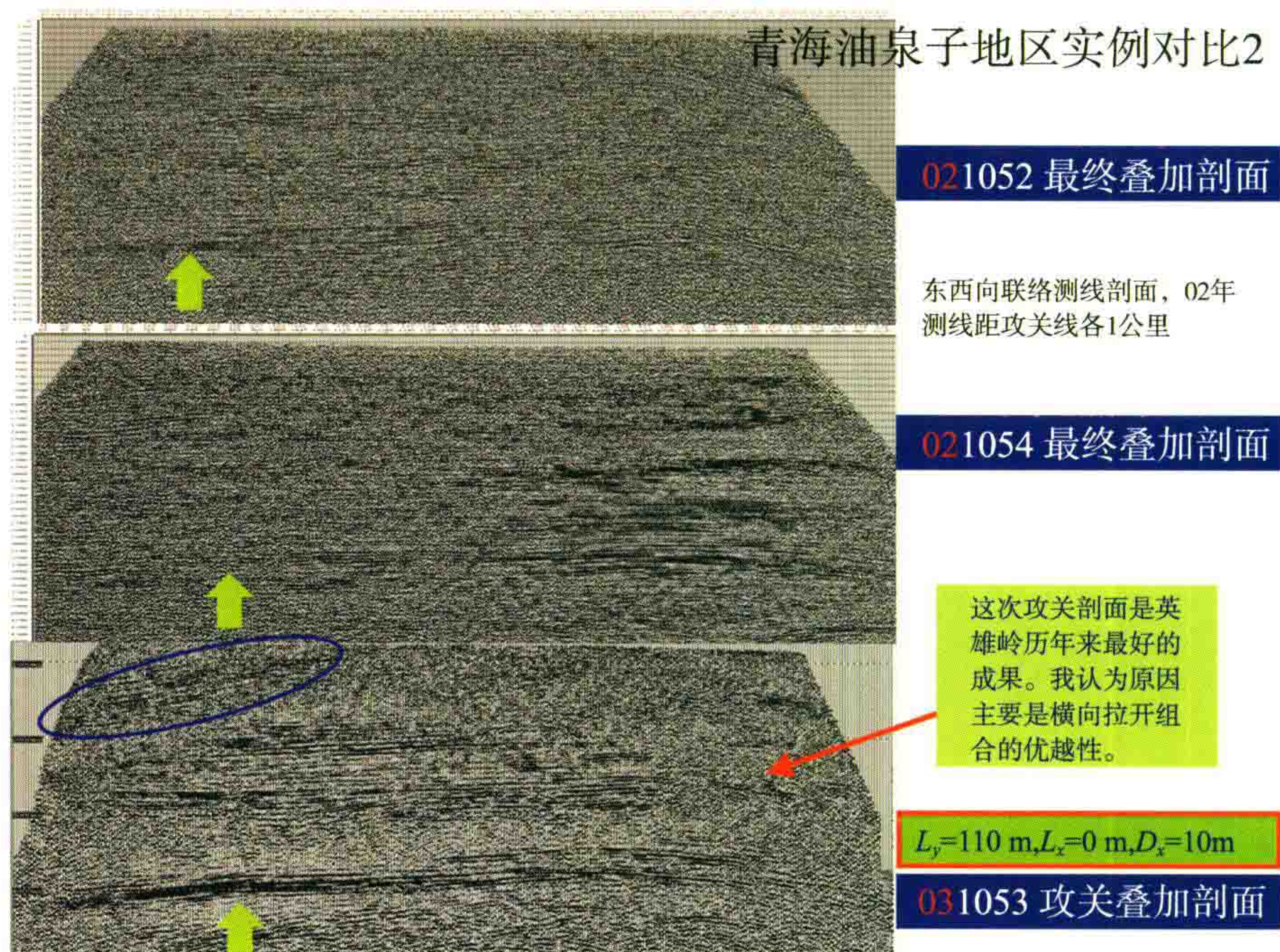


图 21 青海油泉子小道距攻关效果对比(2)

我认为青海油泉子攻关剖面资料品质改进的主要原因不是高密度采集的功绩，而是道距小而不得不采用的检波器横向拉开(L_y=110 m)。

我在 2005 年 5 月对青海油泉子地区的攻关高密度采样资料分别取东西向 Line03-1053 测线和南北向 Line03-039 测线进行抽稀处理试验分析，把道距由 10 m 抽至 20 m。图 22 和图 23 是抽稀前后的剖面对比。从对比图可看出，10 m 道距同 20 m 道距的剖面没有明显差别，所以可获得结论是道距不起主要作用，横向拉开组合 110 m 是本地区资料改进的主要原因。

因此，青海油泉子地区高密度采样攻关资料经抽稀处理结果对比后得出的结论：**不是道距起主要作用，横向拉开组合 110 m 是本地区资料改进的主要原因。**

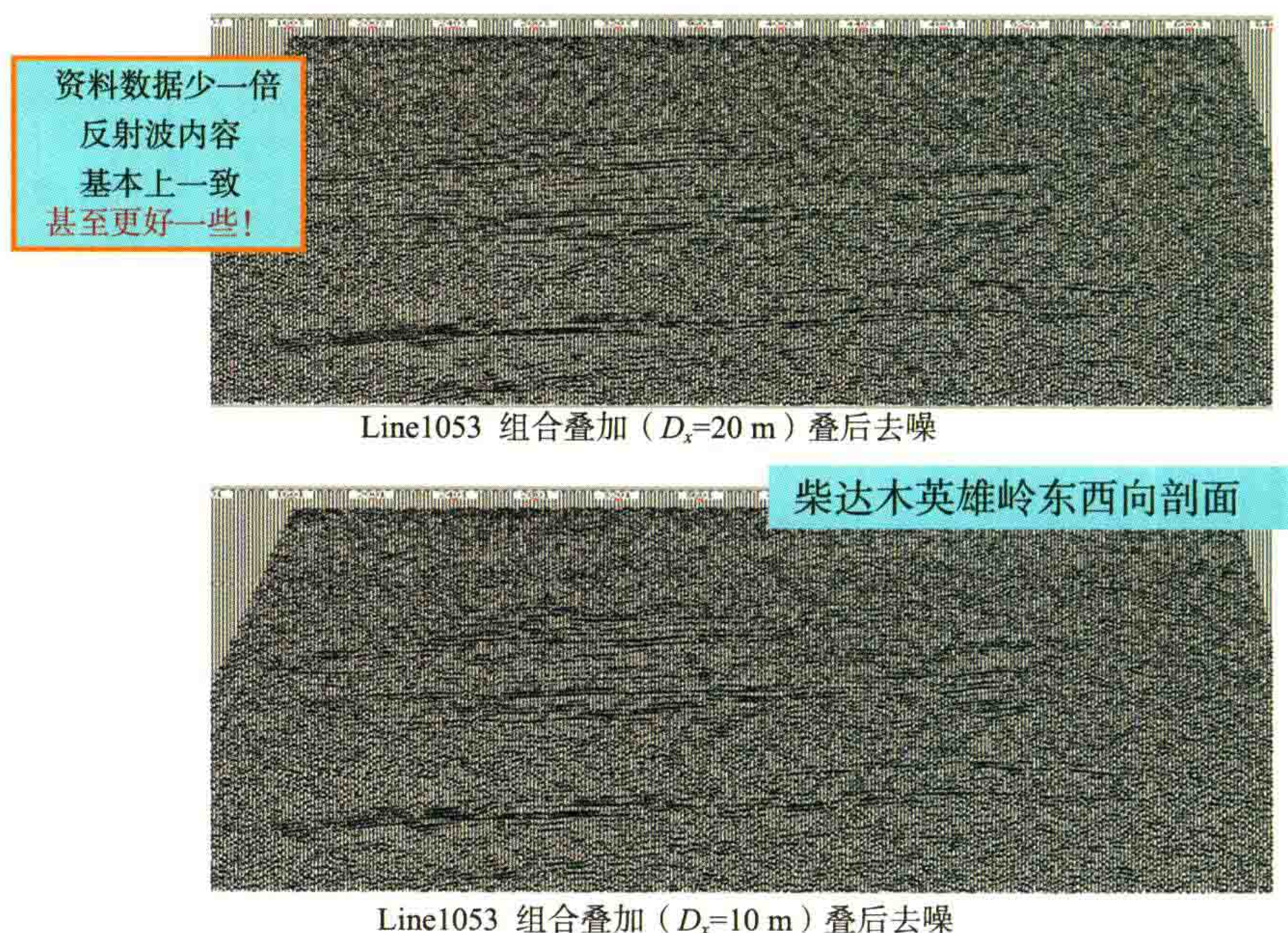


图 22 Line03-1053 测线抽稀前后对比

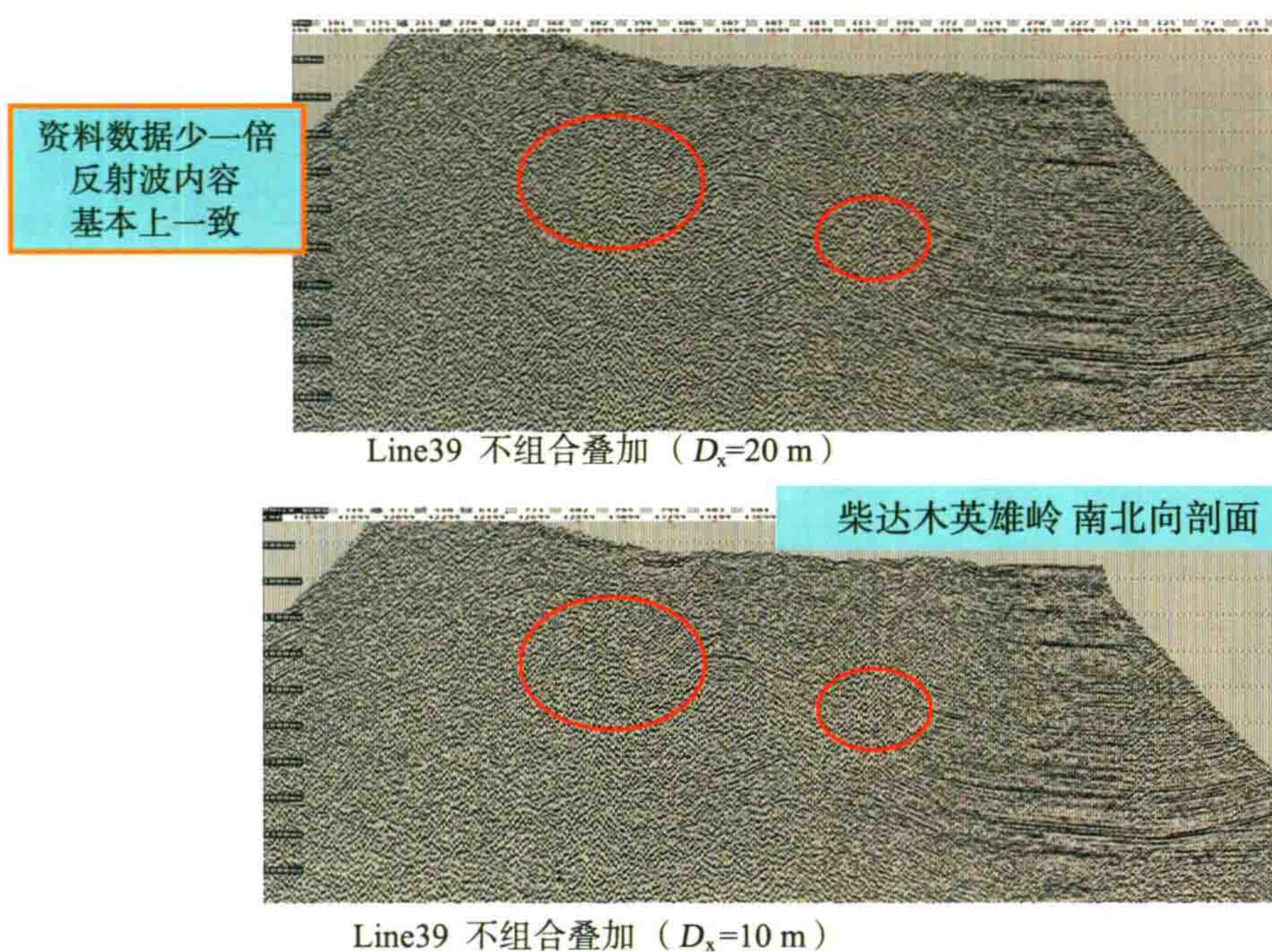


图 23　Line03-039 测线抽稀前后对比

据统计，我国东部地区的三维地震的空间采样密度已经超过每平方千米 16 万道，已经达到国外文献上说的最高指标。炮道密度基本上够了，只是有的三维工区的面元过去划分得不够小，导致偏移成像的质量不够好。**今后要注意，野外资料采集中，宁可覆盖次数降低些，也要换得面元更小(例如 25 m 降到 12.5 m)，就可以改进偏移成像质量。最近已经有不少例子证明同样的野外工作量，10～12.5 m 面元可以提高浅中层反射的成像分辨率。我赞成这种基本不增加工作量的"高密度"思路。**

由于偏移成像过程(不论叠前还是叠后偏移)都是一个严重的低通滤波。许多成像剖面的主频显得很低。所以，我认为目前已有三维的面元较大，但炮道密度超过每平方千米 16 万道的地震资料，虽然其视分辨率较差，但是只要在偏移之后，再增加一次轻度的反褶积以提升高频，或许就能挽救这种偏移剖面主频偏低，视分辨率降低的现象。今后应该尝试并加以提倡。

总之，我认为：海上"高密度采集"效果明显，Q-Land 的效果值得推敲。

陆上高密度采集要考虑所得和所失，大量增加野外投资不一定能取得相应的回报。**大地吸收作用是中深层反射获得高分辨率的主要障碍。陆上高密度采集和"单点接收"技术并不能显著改进陆上地震资料的分辨率。目前的所谓陆上地区高密度采集的效果太好必定另有原因，最可能是由覆盖次数的增高以及不同年份资料处理水平的提高两方面所引起。**

我们呼唤"求实精神"。为了证明"新技术"的效果，现在物探杂志上**广告式的"效果对比剖面"比比皆是**——覆盖次数差好多倍，处理本事差十来年，测线位置不同，效果坏的不提，等等。

(五) 资料处理方面：注意三高处理会造假，拓频处理有讲究

如果高频端信噪比通过处理已经改善，但是叠加或偏移后，没有进一步通过反褶积加以利用，加以表达，此时拓频处理(一般的反褶积就可以)就很有必要。

滤波及反褶积并不改变每个频率成分的信噪比，拔苗助长没有好处。

丢掉低频信号，拔高高频窄带，看起来主频很高，连续震动相位增多，实际上分辨率降低了。从图 24 的不同频带对沙泥岩互层的反映——相对波阻抗对比可看出：宽频 10～160 Hz 反映地下沙泥分布情况很好，但当丢掉 40 Hz 以下的低频信号后在砂泥岩互层的情况下会得到错误的结果。

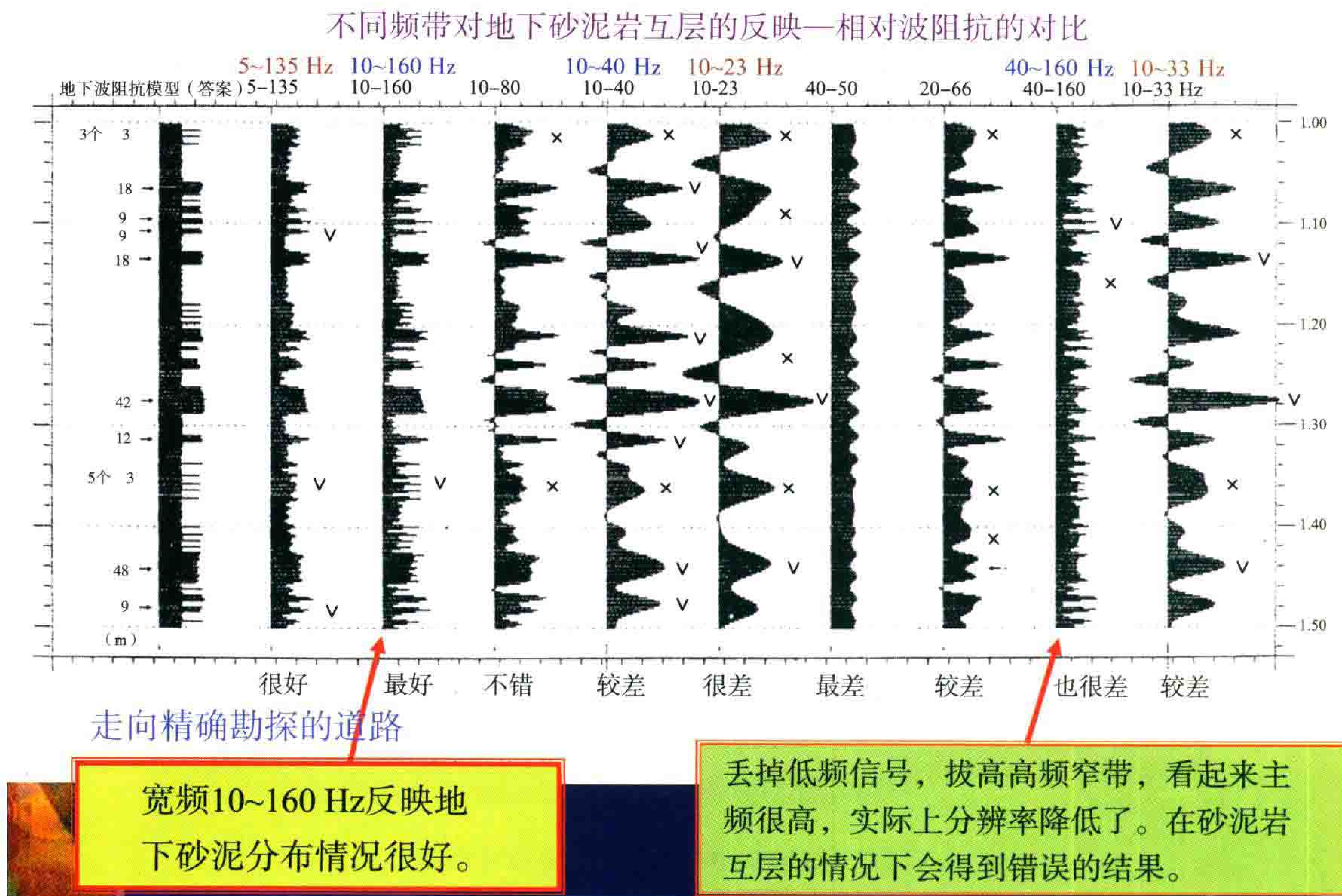


图 24 不同频带对沙泥岩互层的反映—相对波阻抗对比

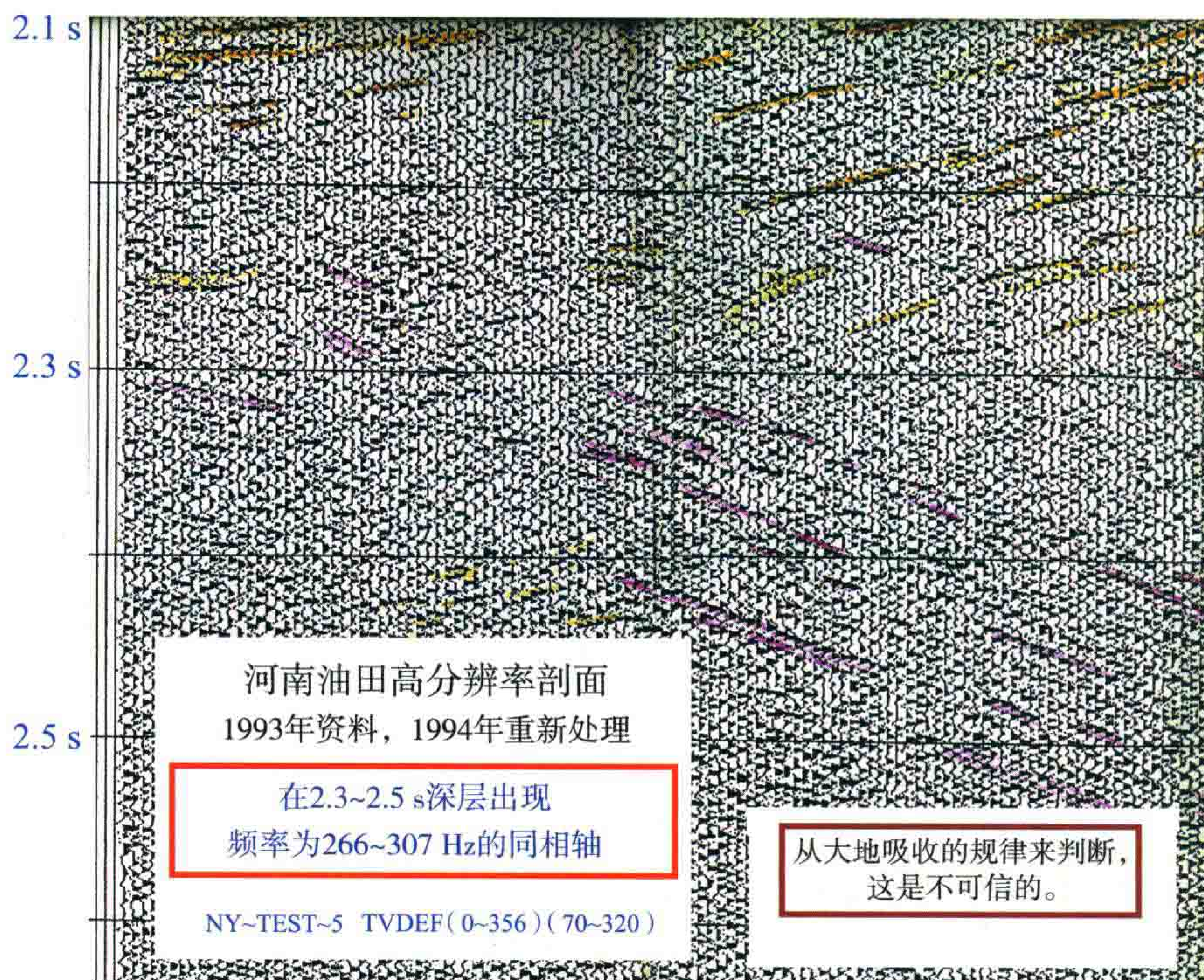


图 25 某高分辨率剖面的例子(1)

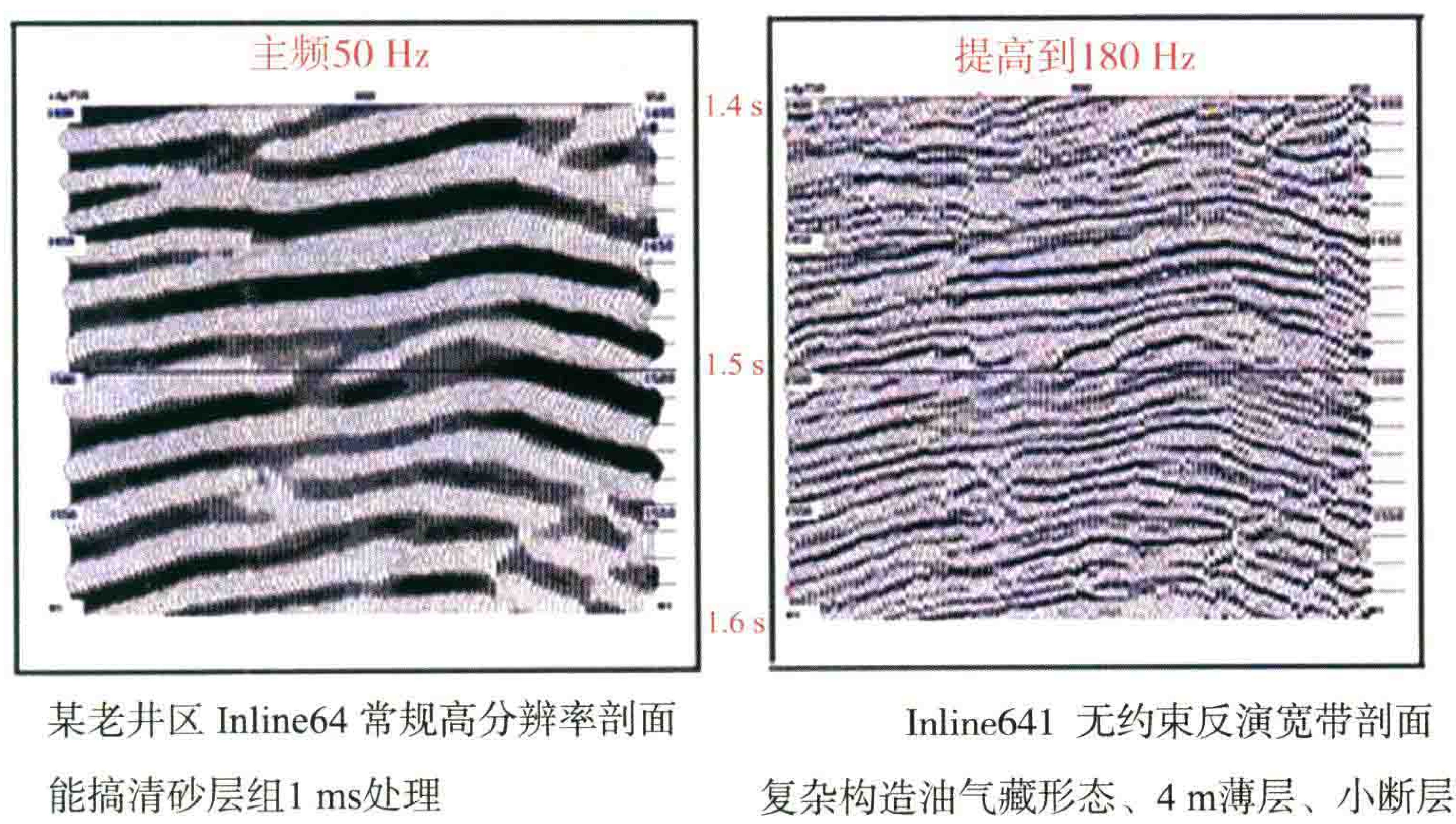


图 26　某高分辨率剖面的例子(2)

图 25 和图 26 是两个处理后的高分辨率剖面的例子。图 25 的例子中，2.3～2.5 s 的深层出现频率为 266～307 Hz 的同相轴。图 26 的例子中，1.5 s 地震波主频达到 180 Hz。从大地吸收的规律来看，这都是不可能达到的。

由于大地强烈的吸收，1.5 秒主频达 180 Hz 是不可能的。

这样的"拔高"处理值得怀疑。

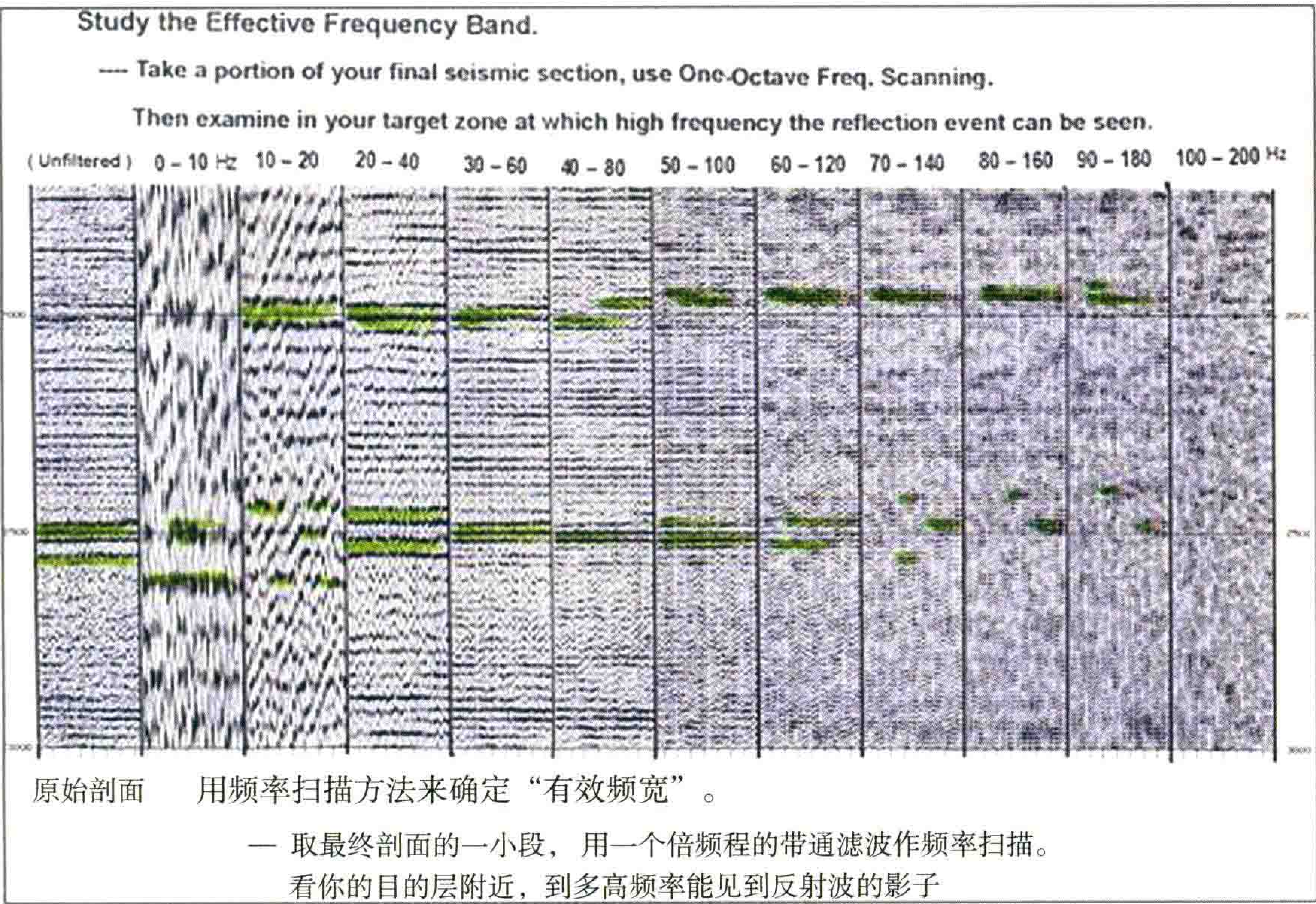


图 27　分频扫描判定某剖面的"有效频宽"示意图

图 27 为分频扫描判定某剖面"有效频宽"的示意图。从分频后的剖面可以看出，**高频端的主要敌人显然是高频随机干扰，信噪比低于 1 时，看不见反射有效波。如果不改进信噪比，它是无效频段，拓频把它提起来也没有用。**

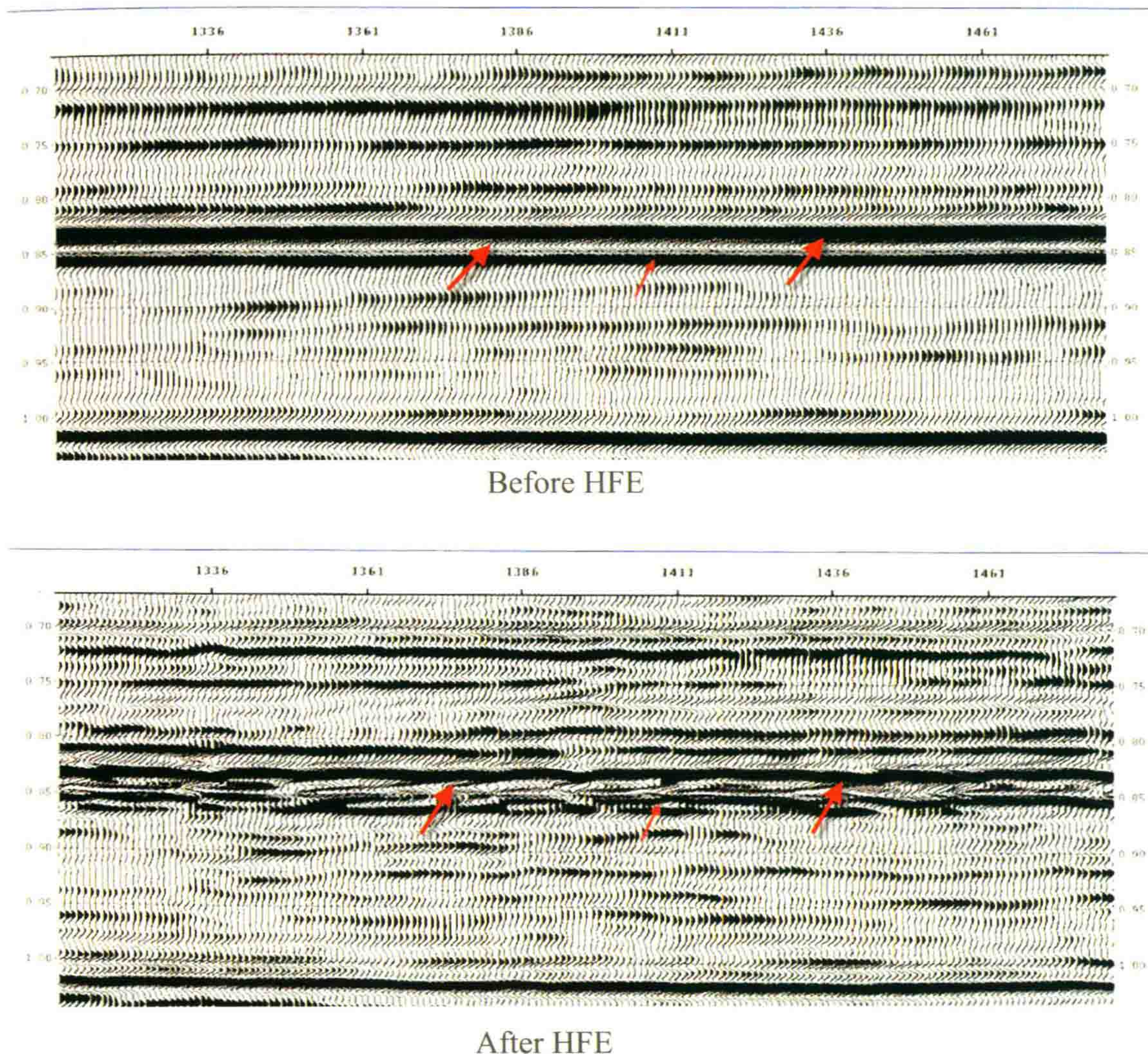


图 28 某公司采用频率拓宽(HFE)技术获得的高分辨率剖面前后对比

图 28 为某公司采用频率拓宽(HFE)技术获得的高分辨率剖面前后对比图。**我不信这是真实的地下结构**！我在《走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析》一书中对一些高分辨率处理方法进行了讨论。图 29 是利用**频域外推法**恢复低频及高频信息的一个理论模型试验的图形。这种频域拓宽的处理方法，即在低频端采用自回归法做预测，在高频端采用最小熵法向高处拓宽。这种方法的确只需要一个窄频带就可以恢复整个频带，从而恢复波阻抗的所有频段。但实际上这种方法只是在不存在噪音的条件下才是对的，每一个噪音(哪怕是一个很小的抖动)都是贡献、分布在全频谱上的，所以**频域拓宽技术肯定也会把噪音同时精确无误地拓宽出来。不从根本上去改变高频段(及低频段)的信噪比谱，只想通过数学的方法做拓宽反演，这看样子是没有什么出路的。**

这是纯数学方法的拓宽——只要频域一段频谱，就可以反演出整个地震道的波阻抗。

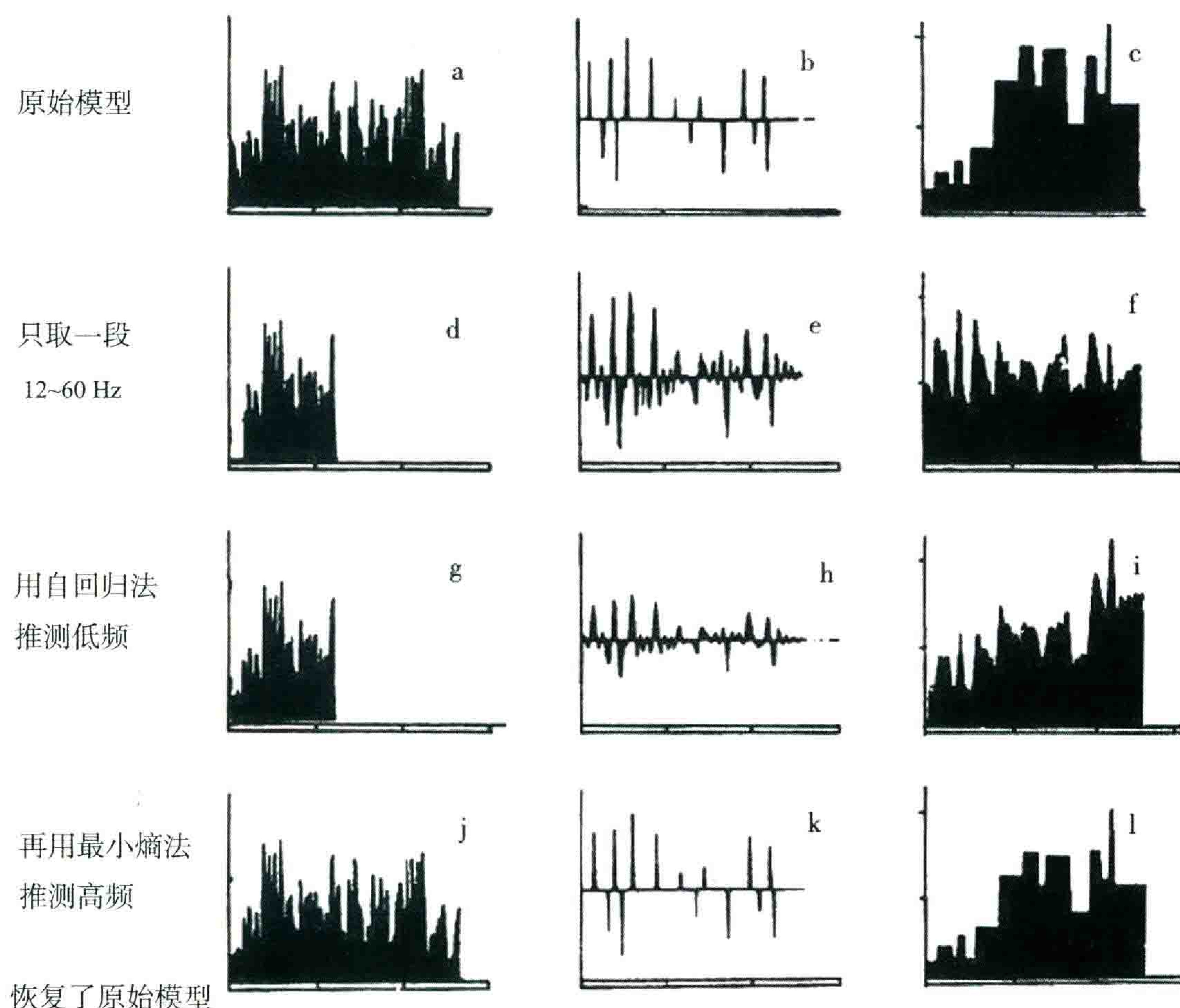


图 29　用频域外推法恢复低频及高频信息

（见《走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析》，图 107）

还有**双密度剖面显示法**（图 30）。双密度显示剖面猛一看似乎频率提高了一倍，其实，这仅仅是不同的显示方法而已。分辨率在这里既没有提高，也没有降低，这种“假分辨率”倒是没有什么坏处，可能还有些好处。

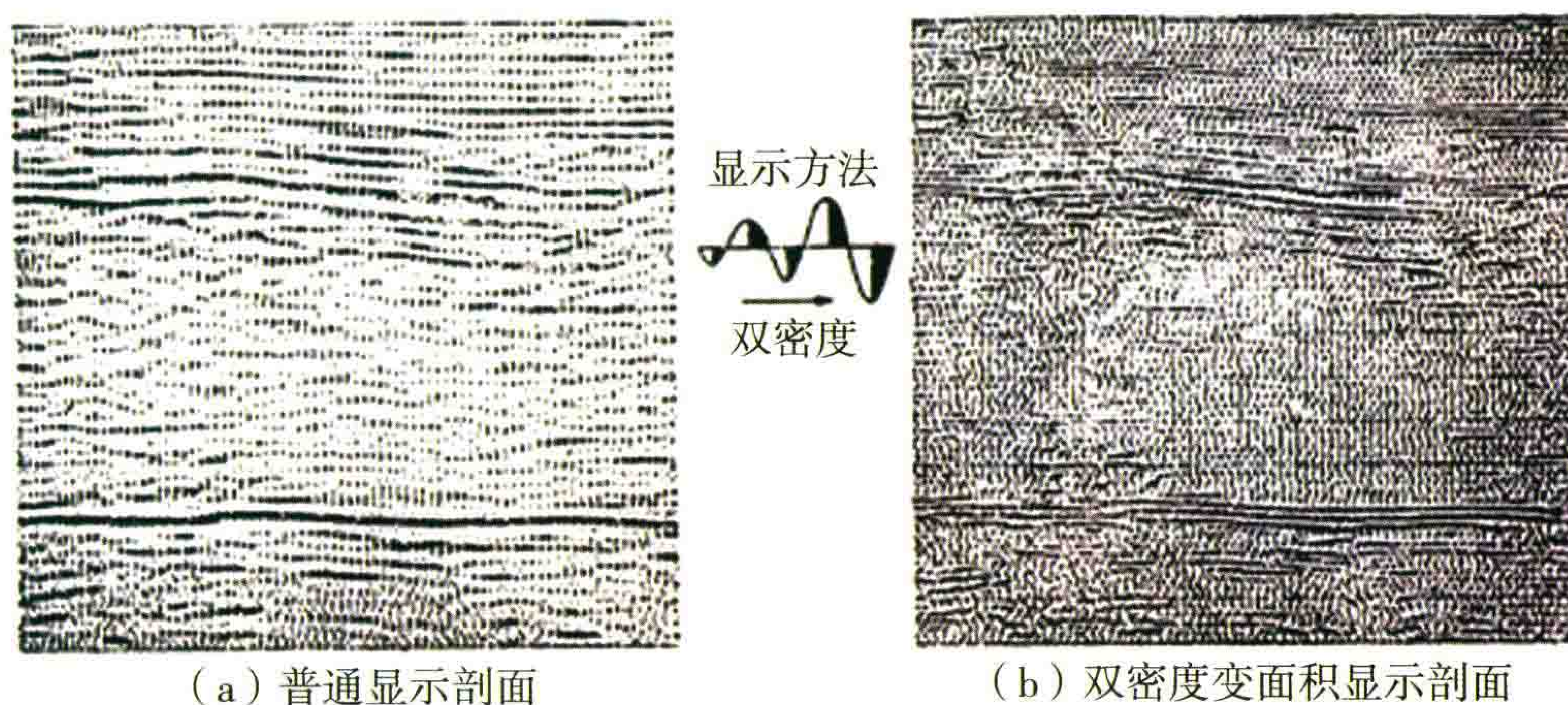
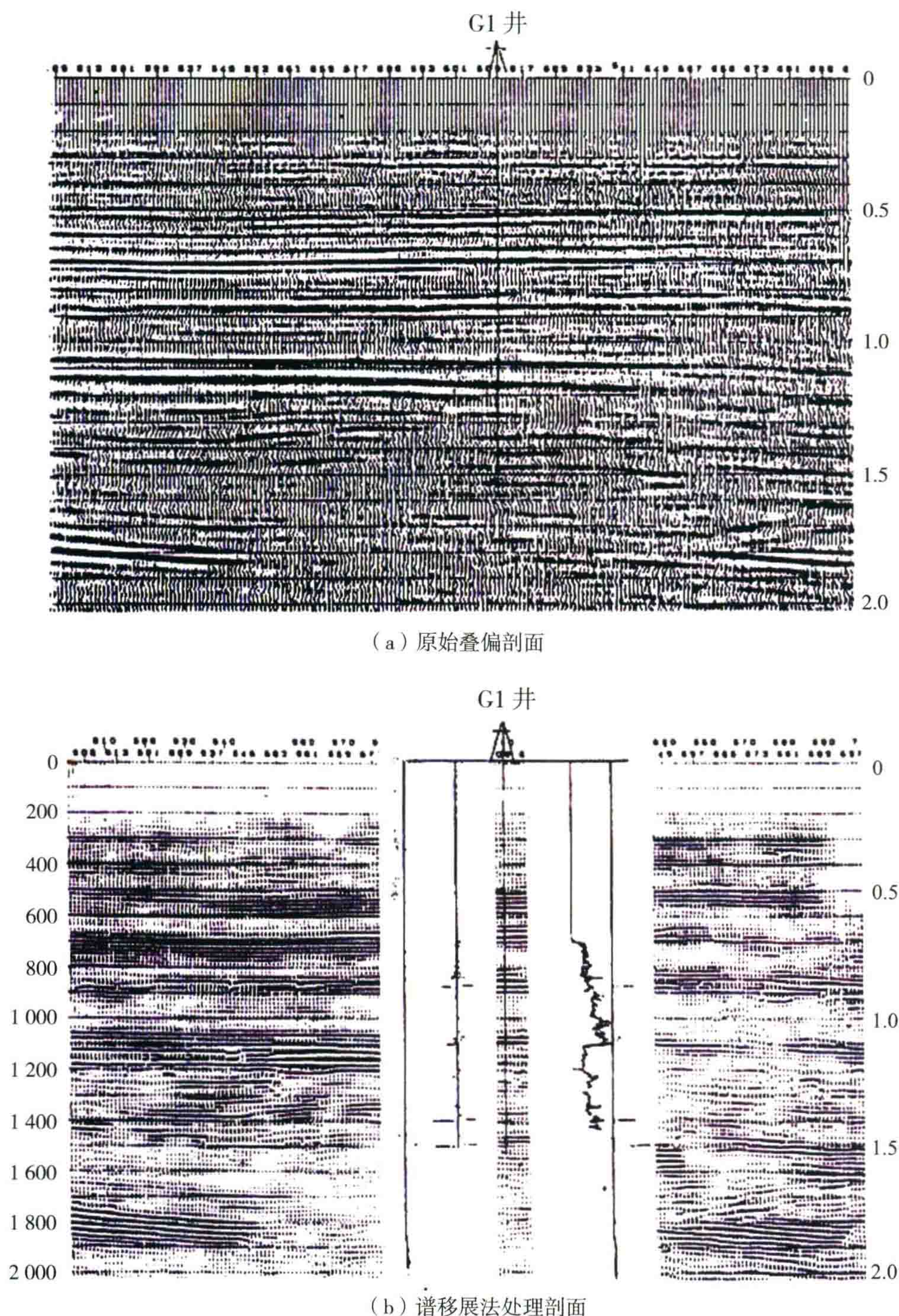


图 30　常规剖面与双密度剖面显示法的对比

（见《走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析》，图 112）

谱移展法（图 31）是一种错误的方法。该方法在地震剖面上寻找同相轴，每找到一根同相轴就记住它的时间倾角，同时对它开一个小时窗做频谱分析，找到它的主频。于是就设计一个振幅谱为三角形的、主

频提高1倍的零相位子波，放回到刚才找到同相轴的地方去，并且按照该同相轴的时间倾角，传送波形到相邻道上去，这便是谱移展法的基本做法。我认为该方法差不多等于用计算机人为地去将主频提高1倍，也就是看到一个轴就让计算机制造两根轴，其后果是“打乱”了反射系数序列的本来面目。因而，这种方法是不值得提倡的，**分辨率是不能人为地制造的**！



（a）原始叠偏剖面

（b）谱移展法处理剖面

图31　谱移展法与叠偏剖面的对比

（选自《走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析》，图113）

PSW(Point Spectrum Whitening)采用最新时频分析方法，求取地震记录各时间点的频谱（简称点谱），展宽高、低频成分，使处理后的地震资料纵、横向分辨率同时提高，剖面子波接近零相位。

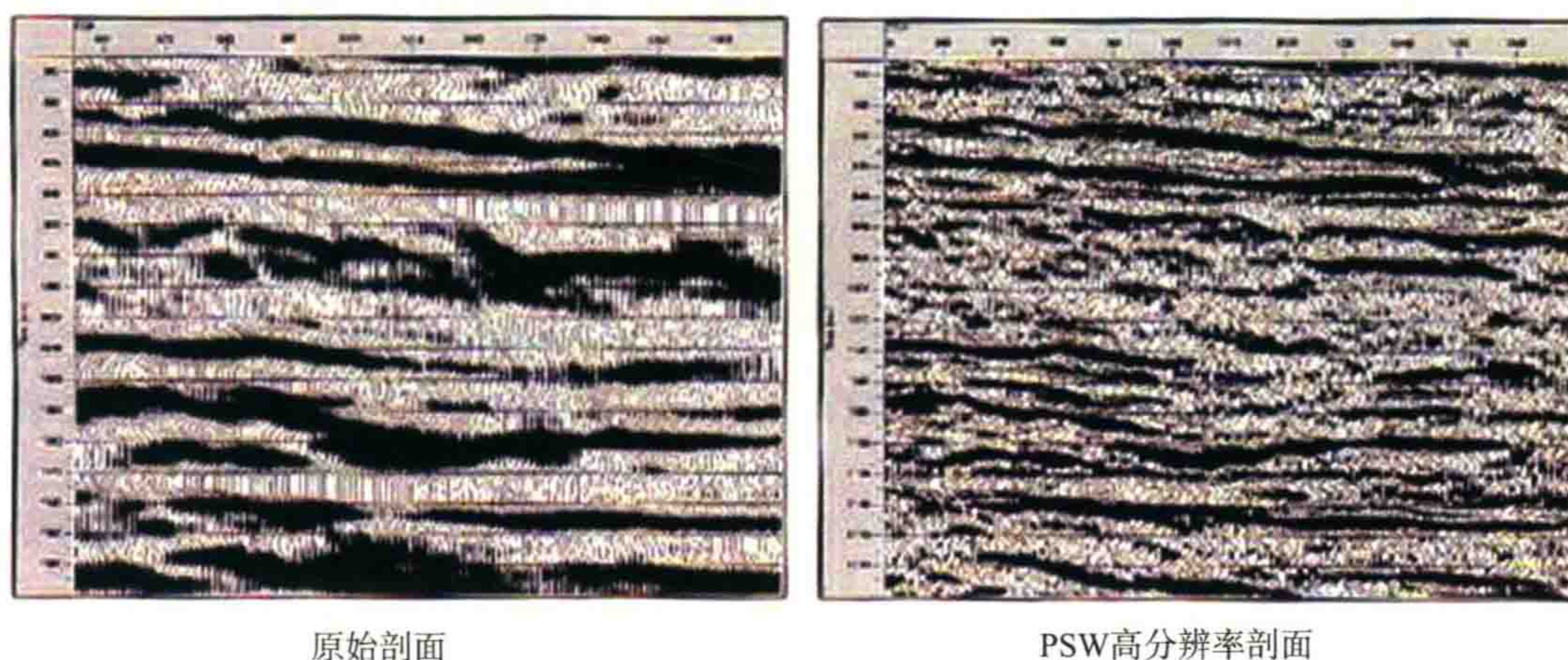
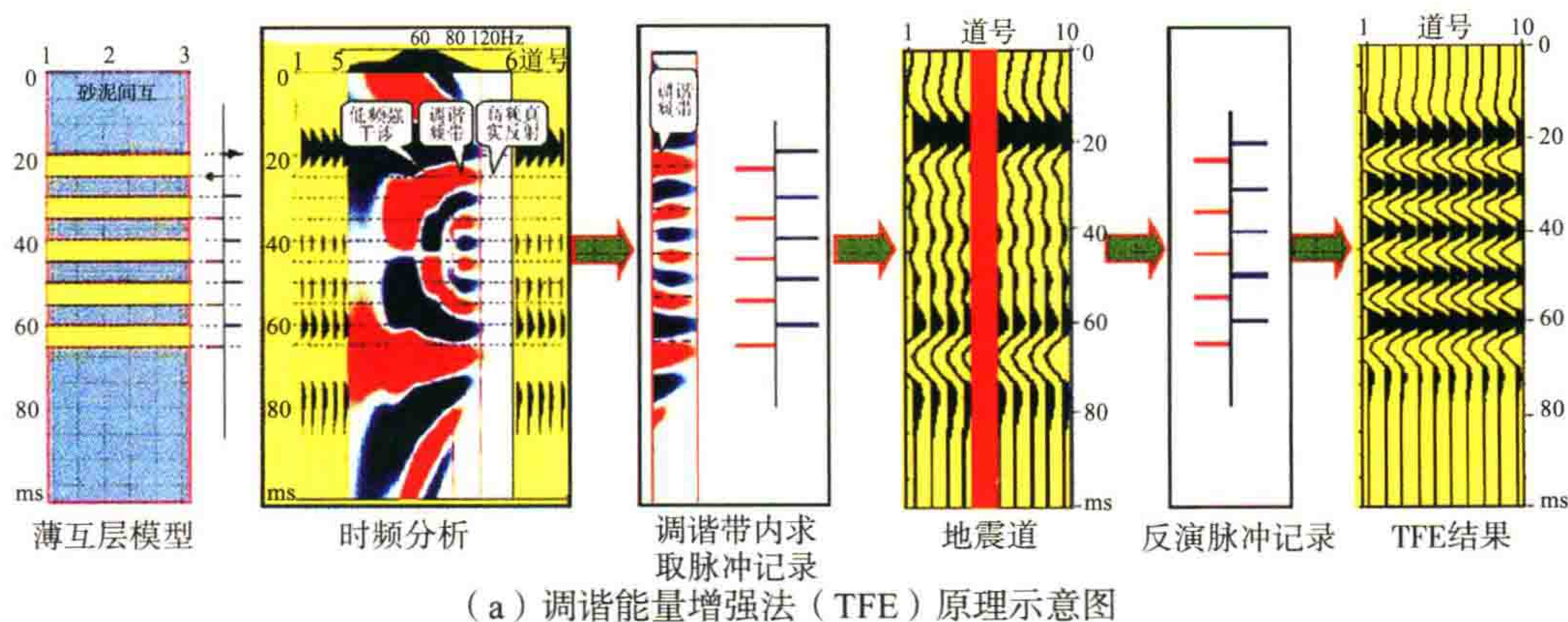
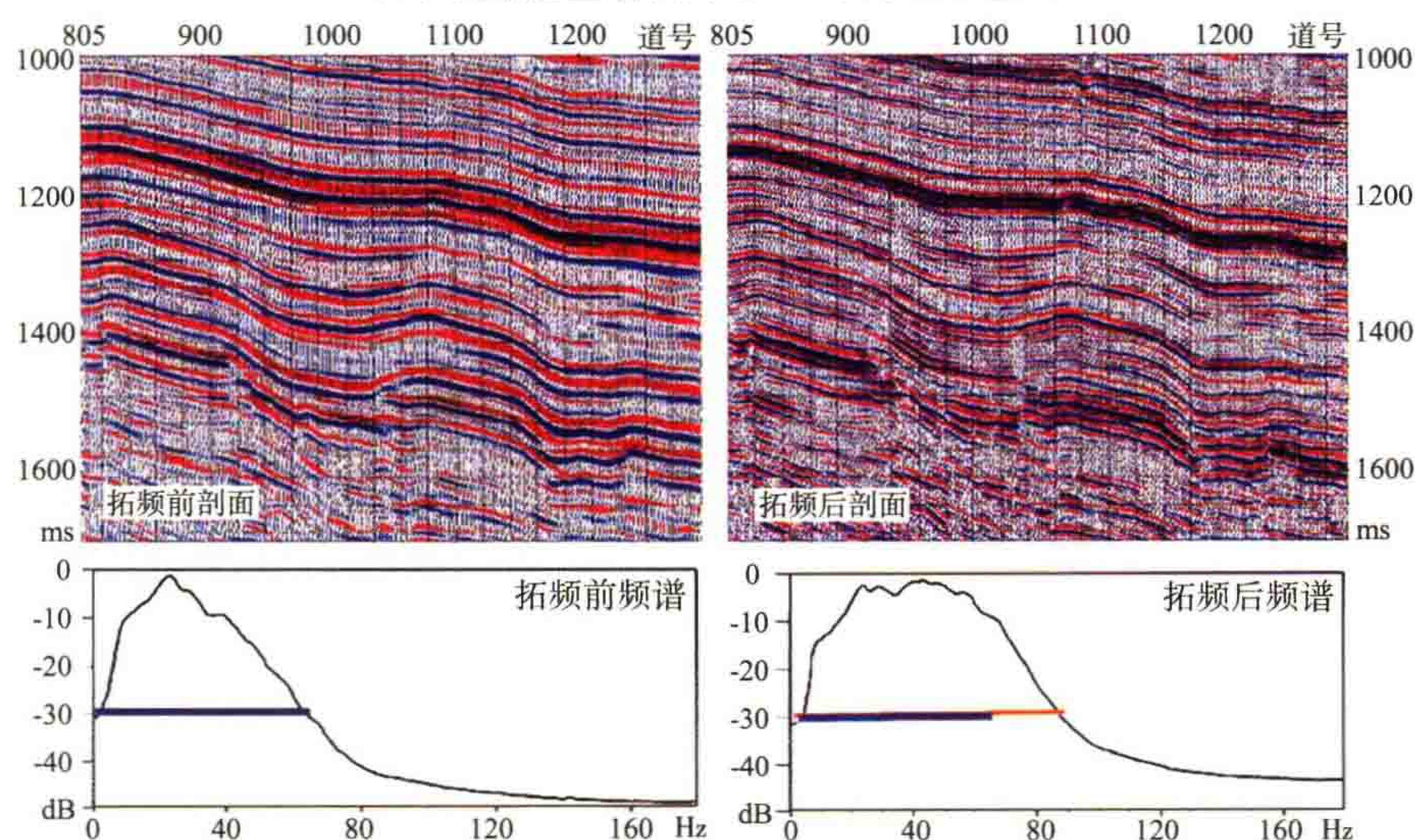


图 32 PSW 高分辨率剖面与原始剖面对比图



（a）调谐能量增强法（TFE）原理示意图



（b）调谐能量增强法拓频处理前（左）、后（右）的地震部面（上）和频谱（下）对比图

图 33 调谐能量增强法（TFE）原理图（a）和处理前后剖面和频谱对比图（b）

Freq. Decomposition 频谱分解法，建立在时频分析基础上的 PSW（图 32）、TFE（图 33）方法、多子波分解 HFE 法，还有小波分析，它们都是利用陷波效应或窄频的滤波效应，突出薄层的响应。对于泥岩为主的地层，它们可以定性地奏效。但是不要忘记，它们是多解的。

如调谐能量增强法（TFE），它是先选取典型地震道做时频分析，分析目的层地震响应的频率分布特征，得到调谐带的范围，然后在调谐带内求取能较好刻画薄层的脉冲记录，建立调谐能量增强的约束条件；

最后使用广义线性反演等手段对地震记录进行反演，逼近脉冲记录，使得调谐带的能量得到增强。使用目标层序体典型地震响应作为约束条件，在调谐能量增强后就能够突出层序体响应频率，使层序体内部的薄层能够较好地识别出来。

图 33 表示了调谐能量增强法(TFE)的原理及处理对比效果。**原理图是对的，但一定是窄带滤波！调谐增强后频谱应该变窄。**

最后提出一种我们有时有意无意要犯的毛病，就是所谓**"丢失低频的高频剖面"**。有意丢失的情况是因为有的人不了解分辨率的基本概念，以为主频越高分辨率就越高。因此有意将 30 Hz 以下的成分滤掉，只剩下 30 Hz 以上的信息，实际上子波丢失低频后频带更窄，分辨率反而降低了，其后果是连续相位增多，分辨率更差。

还有一种情况是无意的，例如为了克服海上的强多次波，而且想研究 AVO 现象，要在水平叠加之前就把多次波压下去，只有采用叠前 *F-K* 滤波。大家知道，在 *F-K* 域中，多次波与有效波像两片向上张开的叶子，其下面(低波数、低频率)在原点附近是互相重叠的。如果你想把多次波彻底滤掉，就必然伤害反射有效波，而伤害的部分是其低频信息。

因此，搞资料处理的人要注意经常在流程中检查有效波的实际频带情况，不要忘记努力争取一个最大的有效频宽。

只有较宽的有效频带子波才能正确地描述地下砂泥岩的分布。

我在《走向精确勘探的道路——高分辨率地震勘探系统工程剖析》中，归纳总结出了**反褶积方法的地质目标。**

采用反褶积方法的地质目标是如下 4 点：① 压缩反射子波的相位数，使剖面上超覆、尖灭等地质现象得以清晰地表现；② 除压缩相位外，还能使子波主频进一步提高，即进一步提高剖面的分辨率，使一些薄层(如砂岩透镜体或礁体的顶、底界反射)的反射现象能清晰地反映出来；③ 调整频谱，使炮点及检波点的影响得以消除；④ 对地震道进行反演，争取获得波阻抗剖面，以求对地层岩性做出判断。其中前三个目标已经基本可以达到：第一个目标使用通常的反褶积方法就可以实现；第二个目标实际上还取决于野外的高分辨率施工质量；第三个目标目前已经有了两步法反褶积方法和地表一致性反褶积方法，频谱是可以得到调整的(对子波相位谱的调整稍微困难一些，"地表一致性反褶积"方法已经初步见到效果)。只有第四个目标，即反射波阻抗是特别困难的，目前只能在个别原始信噪比很高的地区，在十分精心的资料处理过程中，才能获得满意的地质效果。

各种反褶积方法在实际工作中凡是取得成效的，大致有以下几种情况。

(1) 有些剖面的分辨率得到提高是因为输入剖面里本身就有着潜在的"有效频宽"，不曾被前一步处理开发出来(或者是被过去的处理人员所忽略)，因而取得成效，谱白化及反 Q 滤波基本上只是开发这种分辨率的。

(2) 有些输入剖面的子波相位特性原来很不好，通过某种反褶积改善了它，使它向零相位靠拢，因此得到了较高的分辨率，如最小熵、均值范数反褶积等。但是能否达到此目的，其实还靠剖面中有突出的大而单独的反射系数，如果那里有一个复合程度小、比较接近单波的强波，就能对方差模判据起到良好的作用。

多道统计的脉冲反褶积及预测反褶积总能使子波的主要能量向前移动。在这一点上似乎总有些好处(尽管它们有时使子波拖一个低频长尾巴，但其能量是很弱的)。尤其是预测反褶积性能较温和，还能压制短程多次反射，所以似乎总是效果不错的。

(3) 以求取反射系数为目标的反褶积或反演方法中，如果有下列功能便能从处理中提高分辨率。

① 能够使噪音不参与反演，或者使噪音的影响达到最小者。实现这个目标必须是多道运算，在残差剖面中压制那些空间域随机的噪音。或者像 PARM 及 DELOG，从井边出发，然后把第一道迭代的结果作为下一道的初始模型，使第二道有一个良好的导向，不致离谱太远。第三个方法是象 ROVIM 那样，指定

数据的横向变化速率必须和井中的横向变化速率一致，控制其不要向错误的方向迭代。

② 能够在最大程度上利用“先验先知”或约束条件。为实现这个目标，最重要的是**从井出发，并努力使地震资料与测井资料有机地结合起来**，象 BCI、ROVIM、PARM 那样。这是**将来必由之路，也就是走综合之路**。

拓频处理如果用分频处理压噪，再重建合成的方法是会出假的。因为高频端的随机噪声去噪后会留下“假信号”。只有高频段的信噪比得到真正的改善了，才是真的分辨率提高了。

（六）资料解释方面

我没有多少想说的，总的来说是我们的解释本事愈来愈大。

对碳酸盐岩缝洞预测及含油气性的预测是世界级的难题，在塔里木我们做得很有水平。

需要注意的方面：不讲理的属性分析——属性图幅 100 多种。成功的例子很多，不少还有钻井的证实，写成经验总结。

我只是反对使用属性解释的不讲道理，不讲为什么这项属性与含油气有关。

振幅特性与相干体属性是很有用的，频率特性和相位特性问题很多。各种属性图中（例如多子波分解滤波法），有了 n 幅图，你选哪一幅？为什么你选这一幅，别的几幅你不要了？到底哪一幅图可靠？如图 34，图上方常规地震剖面 3 口井看不出振幅有什么差别，图下方 GeoCyber 的 16～23 Hz 档的剖面可以看到两边两口井（红色字）是出油的，目的层位振幅较强，而中间的跃东 101 井（蓝色字）是出水的，它的振幅就偏小。

我要问，其他频档为什么不行？他会说：你有井啊。你知道了哪口井有油，哪口井没油，就可以让计算机“自学习”啊。

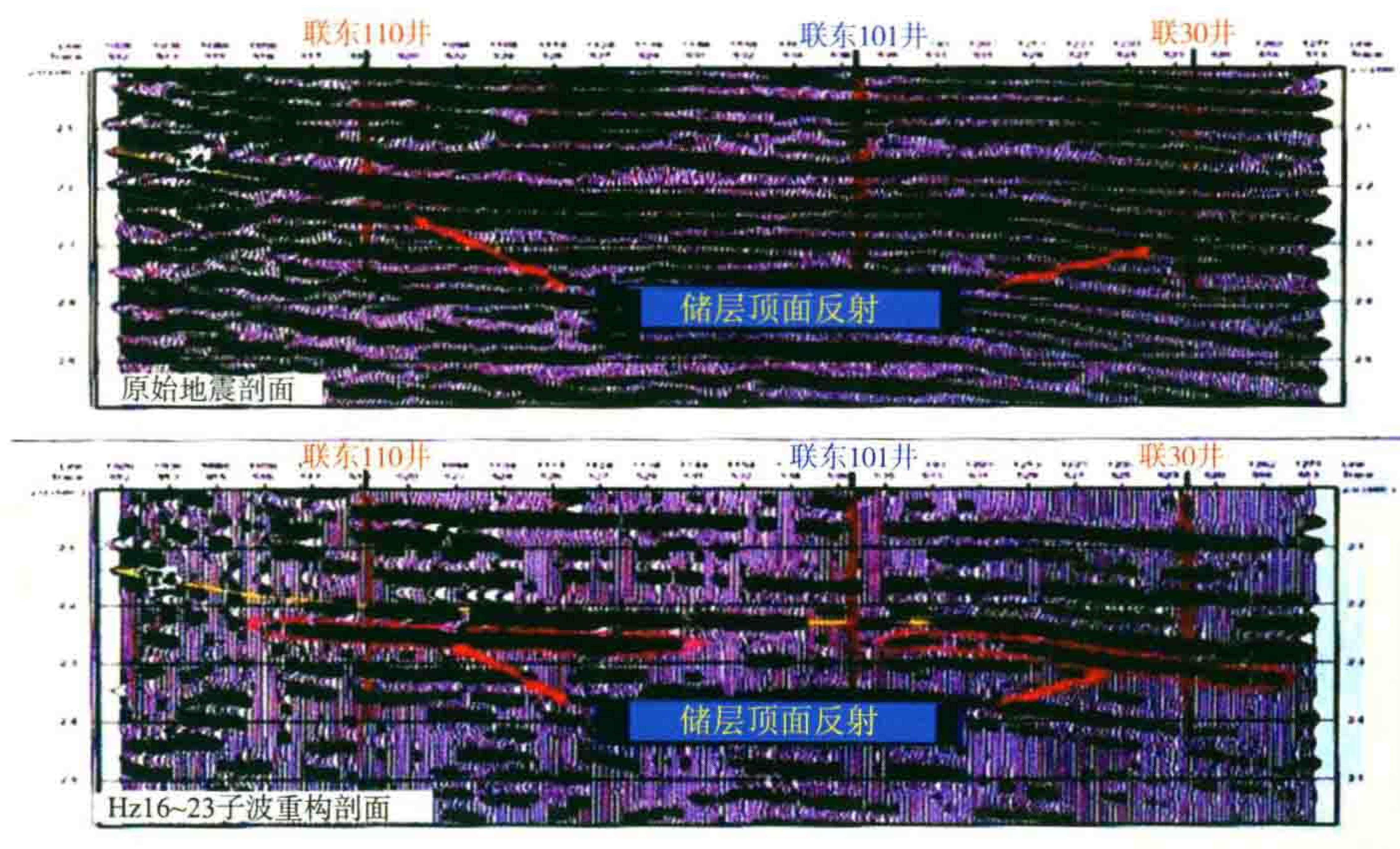


图 34 原始剖面与 16～23 Hz 子波重构剖面对比图

自学习的合理性——指望依靠计算机的功能，是计算机算命。

神经网络，聚类分析——指望新的数学方法。

什么叫“敏感参数”？——长鼻子的不都是人（猫狗也长鼻子）。

敏感参数的有效性——“假相关”的概念值得重视。

多解性问题用主观选择来解决—— 是实用主义。

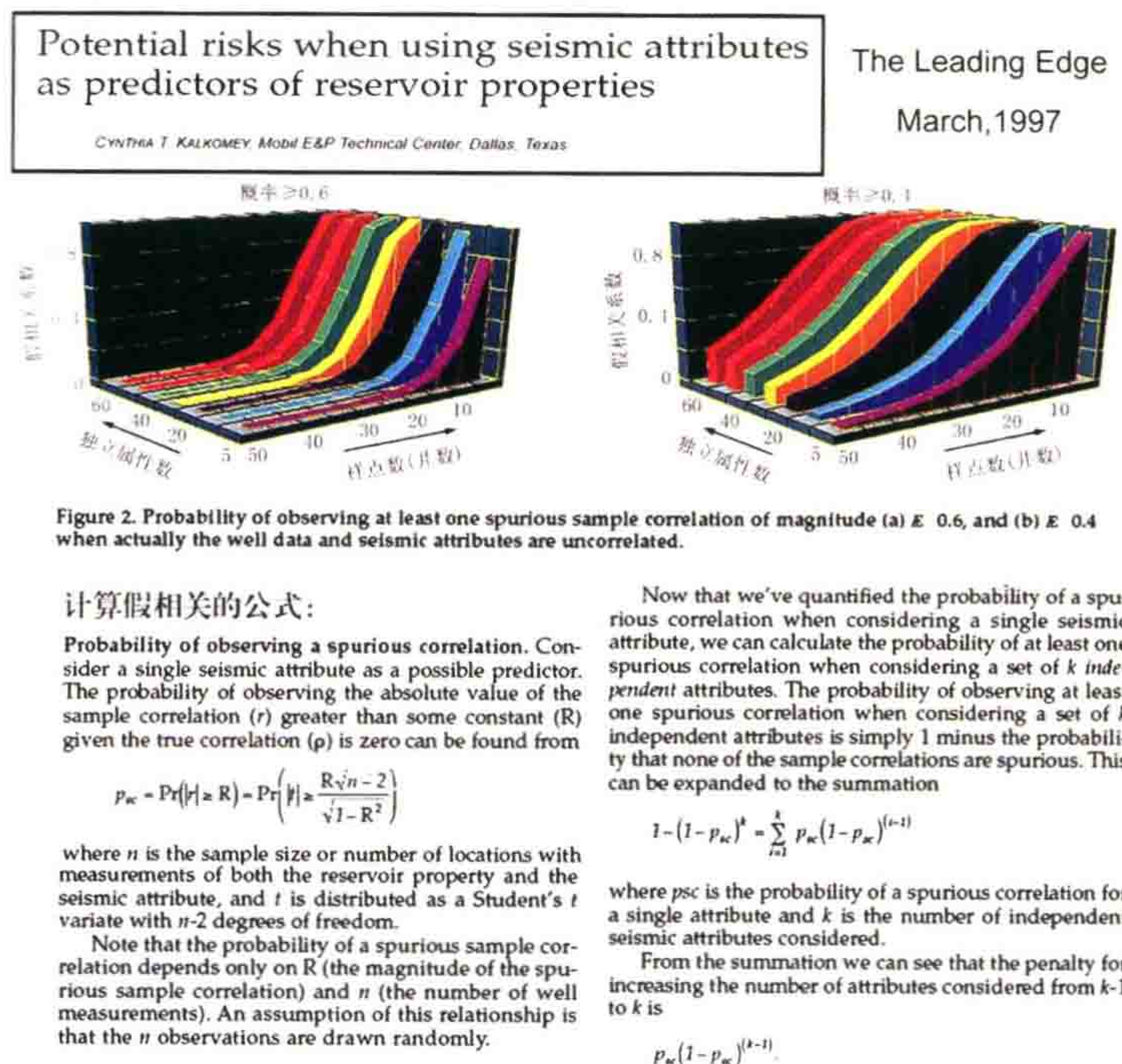
今后要深入研究：“假相关现象”(Spurious correlation)——互相独立的、与答案无关的属性用得愈多，或检验井数愈少，假相关现象愈严重。

如图 35 所示，若采用 5 种属性，有 5 口井检验时，这种情况，出现至少一个假相关（假相关系数达0.9）

的概率为 0.4～0.6！

例如，公安局调查近年来发生的几起重大命案，统计杀人者的特征有 8 项“属性”。于是假设现在又发生了一起命案，人们把凡是符合 8 条的人都抓起来。我看这样做一定会造成很多冤假错案。这就是“假相关现象”最好的注释。公安局调查命案的正确方法是必须到事发现场去收集线索，访问见证人或调阅监控录像，排查嫌疑人，对比血迹 DNA。这才是正确的态度和方法。

找油时，我们应该研究各项“属性”到底与含油性有什么“内在联系”。要讲道理，应该用“正演”的方法加以论证。不讲道理的统计方法是不可取的。有人说：我有 5 口井呀，我可以根据井的有油无油，让计算机“自学习”，可以得到 5 个“敏感属性”，我的成功率就可以达到 70%（其实不科学的随便乱猜的成功率也可达到 50%）。这种“敏感属性”也是不讲道理的。



Potential risks when using seismic attributes as predictors of reservoir properties

CYNTHIA T. KALKOMEY, Mobil E&P Technical Center, Dallas, Texas

Figure 2. Probability of observing at least one spurious sample correlation of magnitude (a) E 0.6, and (b) E 0.4 when actually the well data and seismic attributes are uncorrelated.

计算假相关的公式：

Probability of observing a spurious correlation. Consider a single seismic attribute as a possible predictor. The probability of observing the absolute value of the sample correlation (r) greater than some constant (R) given the true correlation (ρ) is zero can be found from

$$p_{sc}=\Pr(|r|\geq R)=\Pr\left(|t|\geq\frac{R\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}}\right)$$

where n is the sample size or number of locations with measurements of both the reservoir property and the seismic attribute, and t is distributed as a Student's t variate with n-2 degrees of freedom.

Note that the probability of a spurious sample correlation depends only on R (the magnitude of the spurious sample correlation) and n (the number of well measurements). An assumption of this relationship is that the n observations are drawn randomly.

Now that we've quantified the probability of a spurious correlation when considering a single seismic attribute, we can calculate the probability of at least one spurious correlation when considering a set of k *independent* attributes. The probability of observing at least one spurious correlation when considering a set of k independent attributes is simply 1 minus the probability that none of the sample correlations are spurious. This can be expanded to the summation

$$1-(1-p_{sc})^k=\sum_{i=1}^{k}p_{sc}(1-p_{sc})^{(i-1)}$$

where psc is the probability of a spurious correlation for a single attribute and k is the number of independent seismic attributes considered.

From the summation we can see that the penalty for increasing the number of attributes considered from k-1 to k is

$$p_{sc}(1-p_{sc})^{(k-1)}.$$

此图表示：假定井的数据与地震属性完全无关，却能够观察到至少一个假相关的概率情况。

图 35　假相关情况（选自 *Leading Edge March*，1997）

“用模型正演来验证”——应该把现有的各种属性认真分析，走向理性认识。

对各种“直接找油新方法”要考核它的理论基础，不能光看其预测符合率。

“符合率的真相”——预测符合率与探井成功率不是一回事。

完全不科学的“瞎蒙乱猜”的预测符合率等于 50%，这是“概率论”的基本概念。打不出油来时，如果他猜的是没油，那也算他预测成功。但探井成功率不能算在成功之列。

（七）多波勘探的效果

全数字，三分量——“数字革命”好听，花钱，不实用。

井间地震、非纵 VSP、多波、横波分裂——它们都存在不少问题，有的还是很关键的。

我推荐 2003 年石油大学国家重点实验室王尚旭教授的报告——《开发地震技术现状及其发展方向.ppt》（发表于十三陵会议中心）——意识清醒，建议大家一读。

1. 关于横波分裂，他指出：现有确定裂隙方位理论有严重缺陷。

物理模型试验证明，如果地下有深浅两组断裂系统，**当两组断裂方向垂直时，**横波分裂并不是一分二、二分四，而是只有下面的一组断裂系统才起作用——“横波再分裂后，快慢横波的偏振方向只与下面第二层裂隙的走向有关，与上面第一层裂隙无关”。

2. 关于井间地震，他指出："多对井的井间地震在联结处波形对不上，反演层速度也差别很大，可信度很差。"我到现在还认为，根本上是由于搞井间地震的人忘记了波动方程的基本理论和佐布里兹公式，所以无法正确成像。也可参看我在《石油地球物理勘探》2004年第1期发表的《井间地震的误区和出路》一文。

3. 关于多波，认清P波与S波到底哪个相位对哪个是极为困难的。

他指出："纵横波剖面上反射层位要对得很准确，否则失之毫厘差之千里，尤其对于中国砂泥岩薄互层的情况，很难将同一反射界面的反射纵波与反射横波对应起来，这种情况下求取的泊松比的可信度值得推敲。"你们也可以读一读我的书《多波地震勘探的难点与展望》(青岛：中国海洋大学出版社，2007年)。

4. 还有一篇中国石油大学(北京)中国石油天然气集团公司重点实验室狄帮让、孙作兴、顾培成等同志的文章，《宽/窄方位三维观测系统对地震成像的影响分析——基于地震物理模拟的采集方法研究》[《石油地球物理勘探》，2007，42(1)]。他们通过地震物理模拟的采集方法，研究结果指出：在没有各向异性的条件下，宽方位和窄方位三维采集都能对地下目标实现基本正确的地震成像，而且两者的成像分辨率基本相当。也可参看我在《石油地球物理勘探》2001年第1期发表的《对宽方位角三维采集不要盲从——到底什么叫"全三维采集"》一文。

一味跟着外国新技术走，并且跟着吆喝，今后怎么办?

二、10个方向

回顾过去：

我们有着一批长期从事物探工作的骨干。他们在长期的实践中成长，有技术知识的积累。

20世纪60年代与北京大学合作200号工程，造出了150计算机，处理出"争气剖面"。

胜利油田，攻关队造出地球物理勘探仪器。

三维地震、物理地震学、商河西数字处理会战，**我们独立自主地发展着物探技术。**

"文革"初期，从法国引进技术装备，"风庆轮号"事件——多磨难。

唐克老部长，王涛、阎敦实、邱中建等部领导都重视物探，努力推进物探装备与技术的引进，推动了物探技术的进步。

改革开放，我们站在世界物探技术成果的肩膀上。

我们有万国软件：CGG、WESTERN、PROMAX、PARADIGM、JASON……

我们有万国仪器、万国装备，可以博采众长，于是走着一条引进、消化、再创造的快速发展的道路。

我们有一个良好的出人才的机制。

我们有总公司领导的支持，鼓励和帮助。

我们有与国际交流的良好渠道。SEG和EAGE开始高速发展。

但是也存在一些缺点和不足。

长期靠技术引进也带来了依赖思想和只相信洋人洋货的思想，带来了不敢独立创新的弊病。

在野外采集方法方面总以为不如人家好，迷信数字检波器，迷信Q-Land。

我们自己的创新意识淡薄了，推广自己的"实用技术"还缺乏力度。

其实我们这几年在山地地震技术方面已经走在世界前列。多种震源的分地表施工，多种静校正方法联合使用，灵活的采集系统，近地表模型的圆滑基准面及中间参考面校正技术，准确而高效的山区施工效率。CGG等外国公司承认他们不如我们。

沙漠地震的资料质量也是世界领先的——8 m吹沙桶、沙丘曲线静校正、全盆地低降速带数据库、叠加速度库、全部潜水面下放炮、塔中大沙漠1-4井的准确命中率。

前年发布了PAI品牌，长了BGP的志气。但是从整体上讲，改革开放以来，我们却没有养成实事求是、独立思考的研究风气，一味跟别人来学。

找油的领域愈来愈广，难度愈来愈大，我国西部还有不少工区地震方法没有过关。需要技术攻关，**但我感到更重要的是观念的创新，求实的态度和技术管理一路的保证。**

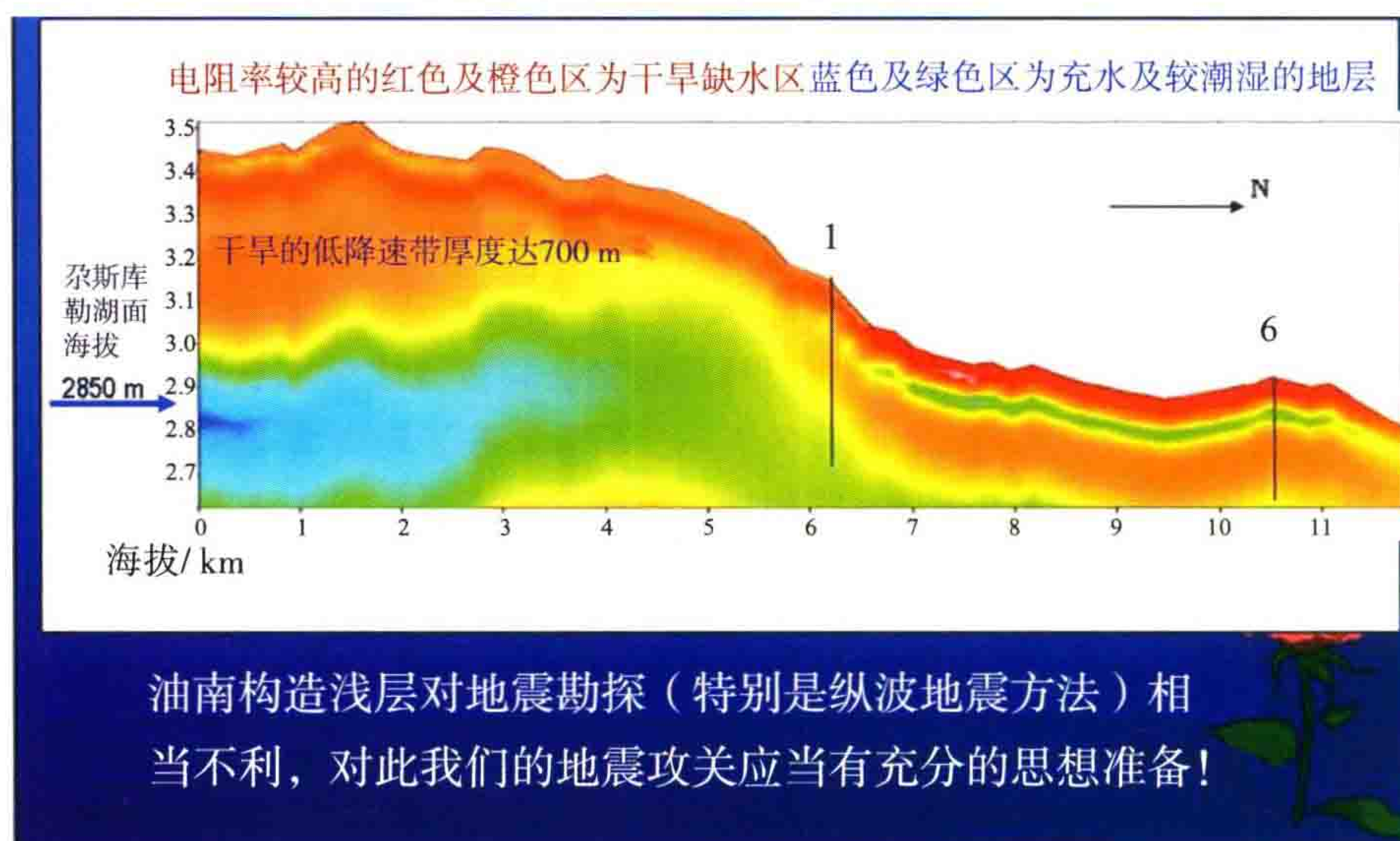


图 36 油南高频电磁浅层结构调查研究图

地震勘探的确取得了极大的技术进步，但缺乏的是本质性的改进，**需要的是从本质方面提出问题和解决问题，不是从书本上来，也不能靠外国人来帮我们解决中国的复杂难题（我国西部干旱的山体低降速带厚达 500～1200 m，产生了严重的信噪比低下及速度场复杂的难题，这是外国所没有的），今后还是要靠我们自己来解决。**

如图 36 所示，对柴达木盆地英雄岭地区油南高频电磁浅层结构调查研究表明，油南构造浅层对地震勘探（特别是纵波地震方法）相当不利，对此我们的地震攻关应当有充分的思想准备！

这是世界级难题！

以下我列出今后地震勘探技术进步的几个重要方向。

10 个方向：主要是针对我国西部低信噪比地区提出的。

(1) 用“横向拉开组合——宽线大组合”攻克山地资料品质关。

过去我们只注意了沿测线 x 方向的组合，遗忘了非常重要的垂直测线 y 方向的组合。横向拉开组合才是克服沙漠及山地的各种次生干扰波的强有力武器。我曾反复强调，侧面来的强干扰如果没有 y 方向的组合，一旦让它进入记录，它的视速度很高，就无法再把它消除干净，成为强干扰背景。从 1999 年以来，本人一直呼吁要把检波器垂直大线方向拉开 150 m，并且组内高差应该允许±15 m(30 m)。排列上只要有 50%的道横向拉开组合了，记录面貌就会有很大的改进。我希望大家解放思想，争取早日攻克低信噪比难关。但是由于这种方法对乙方造成“施工麻烦 ”，我呼吁了多年，始终没人重视。

这两年，在塔里木指挥部杨举勇同志的大力推动下，发明了“宽线＋横向大组合”后，在山地地震二维采集中大幅度提高了剖面质量。他们不但在高陡的秋立塔克山得到较好的剖面，而且在塔西南巨厚黄土区及大沙漠里都取得明显成效，这个经验值得总结推广。我深信今后在准噶尔山前及青海英雄岭地区也应该能获得好的资料。

对三维采集也要强调横向均匀拉开组合。目前三维地震的野外施工接收线距一般为 200～400 m，人们施工时，仍旧习惯地只沿大线 x 方向组合。这样，虽然 y 方向也有 4～6 条线的组合，但是 y 方向的组内距 200 m 太大了，今后应该在 y 方向也提倡检波器分布均匀。

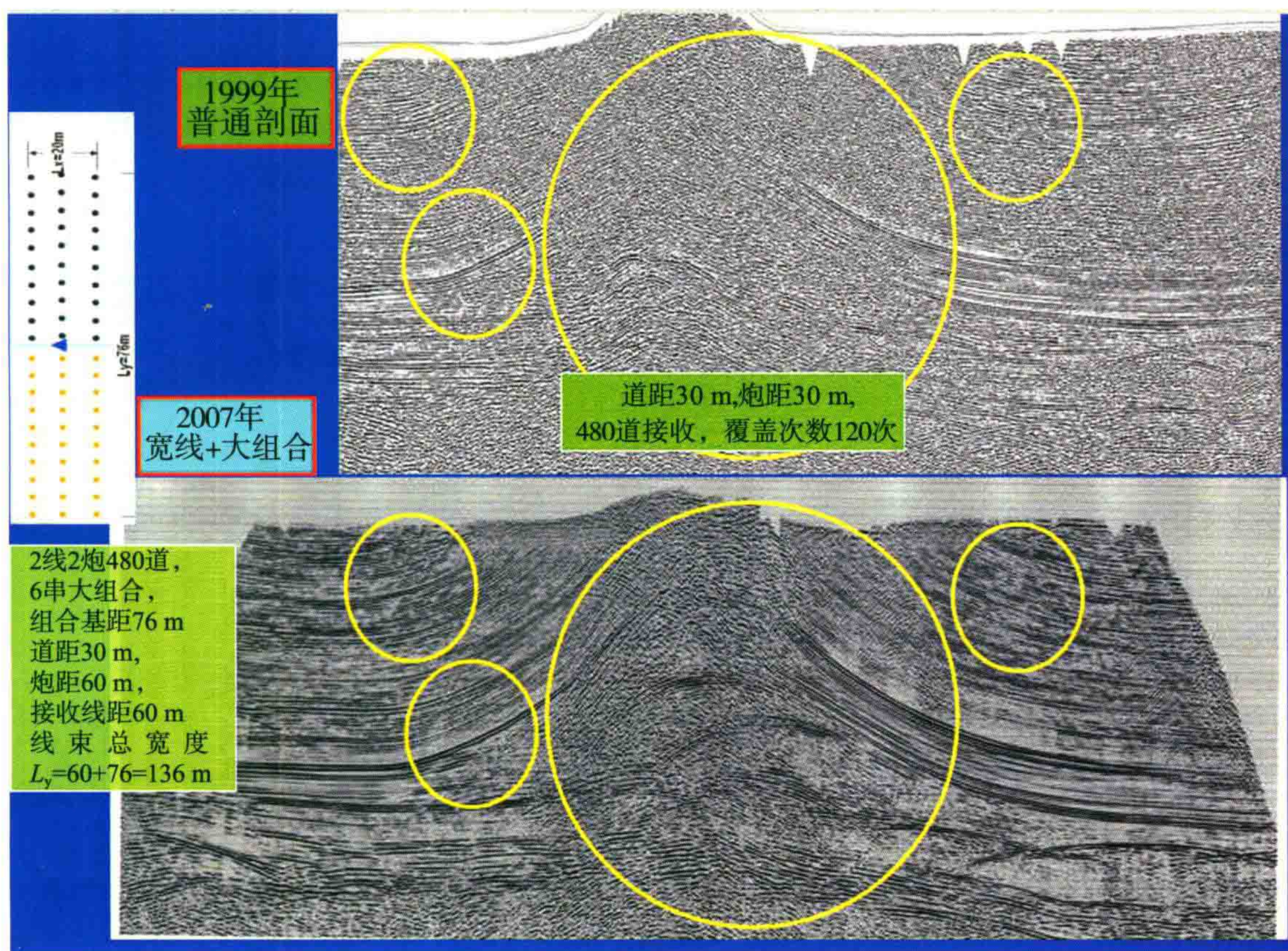


图 37　塔里木盆地宽线大组合与常规二维方法剖面对比

图 37 是在塔里木盆地库车地区山地的一条宽线大组合(2007 年)与常规二维方法(1999 年)获得的剖面的对比图，取得了明显的效果。构造翼部和顶部的反射波出现“从无到有”的戏剧性变化，而且这两条对比剖面的总放炮数还是基本上相当的！可见横向拉开组合的神奇效果非同一般。

塔东南的古城地区地表是高大沙丘，过去地震资料不好，现在采用了宽线＋大组合，也使资料品质有了很大的提高。图 38 是古城地区的新旧剖面的对比(两测线平行，并不重合)。上面 3.6 s 处是古生界灰岩顶的反射；下面 4.3 s 是寒武系顶反射，右图新剖面的中间部分是灰岩内部结构的情况，真漂亮，寒武系顶小断层都非常清楚。这个例子有很大的说服力，塔里木指挥部对此剖面极度重视，他们说：“今后宁可要一条好剖面，不要 10 条差剖面。”

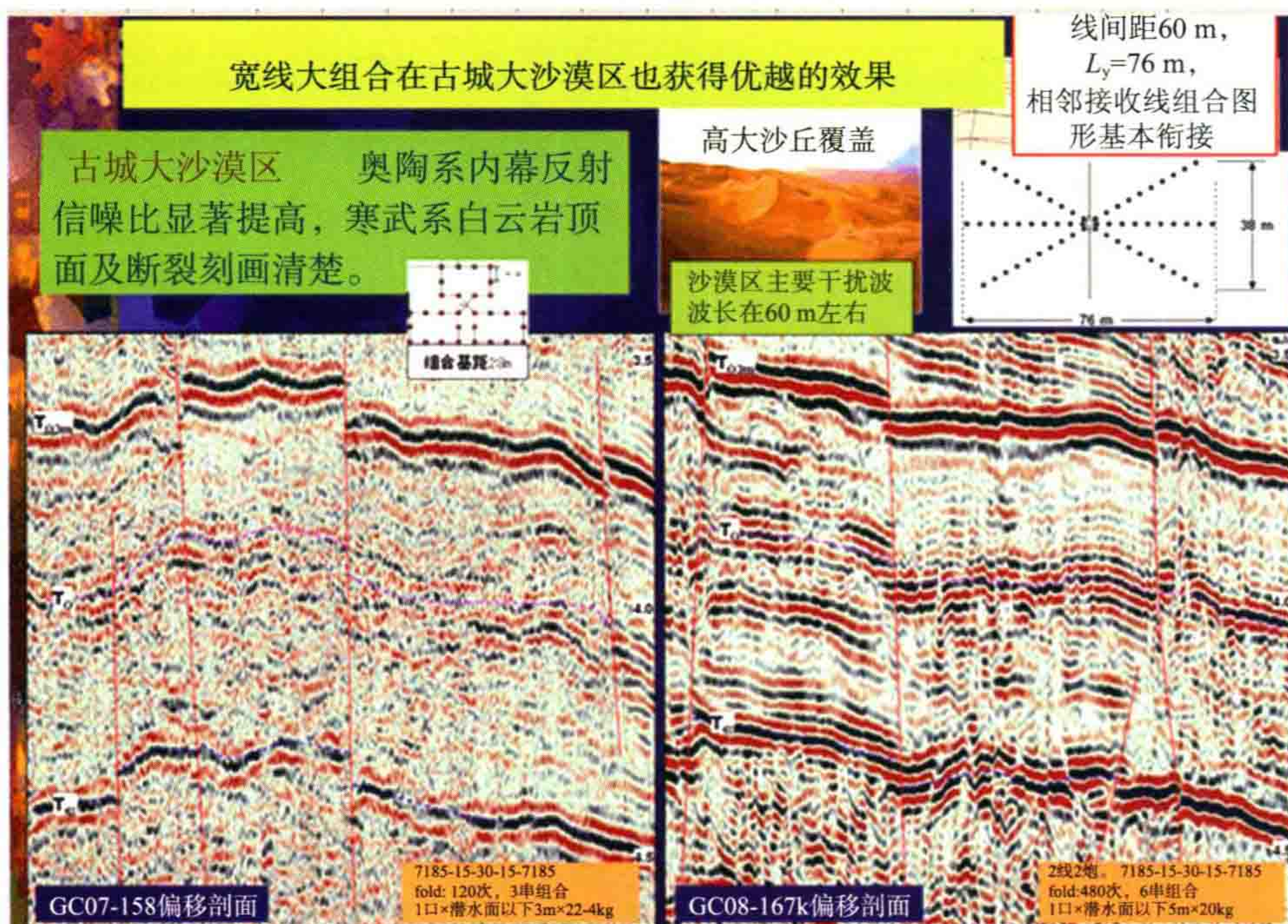


图 38 塔里木盆地古城宽线大组合采集效果

对于柴达木盆地英雄岭地区，我认为英雄岭下应该有个大油田，油南的重力高表明，这个深层大隆起的存在是不成问题的，但反射资料还很差！图 39 所示的油泉子 2006 年 040 地震测线所获得的新资料就值得进一步改进，因为 L_y 只有 48 m，横向没有拉够距离，白搭！

假设干扰波的传播速度为 3000 m/s，主频为 20 Hz，干扰波视波长为 150 m。如图 40 所示的组合特性曲线表明对于视波长为 150 m 的干扰波，采用跨距 L_y 为 150 米的横向组合跨距可以很好地压制干扰波。如果跨距 L_y=75 m(缩小一半)，则干扰波剩余量将为 63%；如果跨距仅有 30～40 m(例如两条宽线间的距离 30 m)，则干扰波基本得不到压制。40 m 的网，抓不到 150 m 的大鱼。

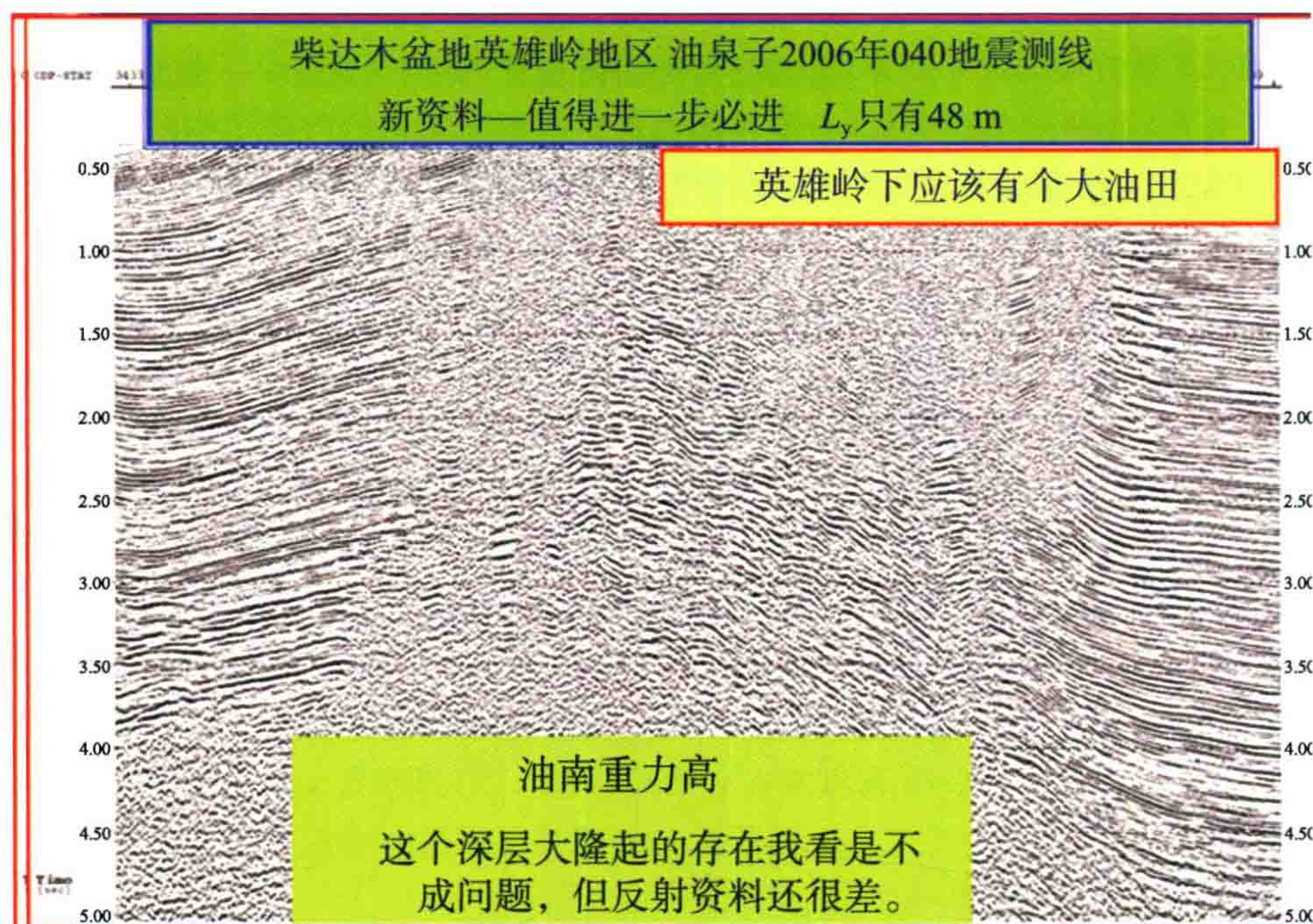


图 39 柴达木盆地英雄岭地区地震剖面

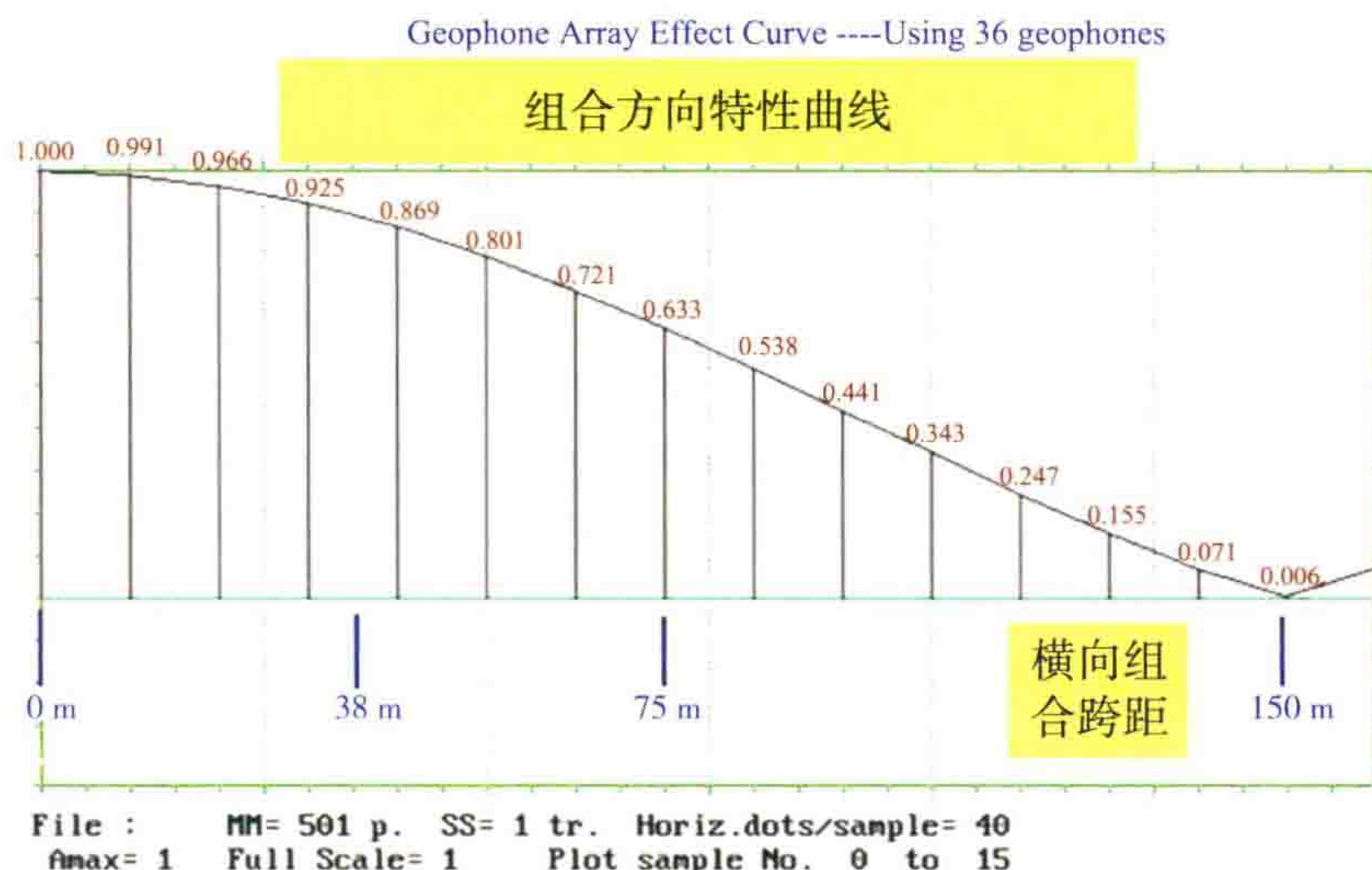


图 40　组合方向特性曲线

(2) **对困难山区，应放开对组合高差的不合理限制，**山区允许组内高差±15 m（即组内绝对高差30 m）。**墨守成规，废品一张；放宽一步，海阔天空。**参看我 2007 年文章——《高密度采集中组合效应对高频截止频率的影响》[《石油地球物理勘探》，2007，42(4)]。

(3) **放成千个小炮，用"深井 VSP 层析求速度场"**——我称之为 VSP-DEEP-TOMO 求速度场的方法，能够解决叠前深度偏移的正确速度场求取。

山区地震资料偏移成像的关键在"偏移速度场"的准确性，到目前世界上还没有太好的办法。我们在玉门的窟窿山三维及塔里木的却勒地区都碰了钉子，至今束手无策。

我国西部地区叠前深度偏移之所以难以取得成效，归根到底是因为速度场很难确定。干旱的山体低降速带厚达 500～1200 m，这是外国所没有的。小折射、微测井只是隔靴搔痒，打深井求表层速度代价太大，也做不精确。叠加速度在山区是完全不可信的。普通层析方法又遇到射线下去后，回不到地面，形不成回折波的情况。这个问题将长期困扰着我们，国外也没法解决。我设想可以通过 VSP-DEEP-TOMO 的办法加以解决。

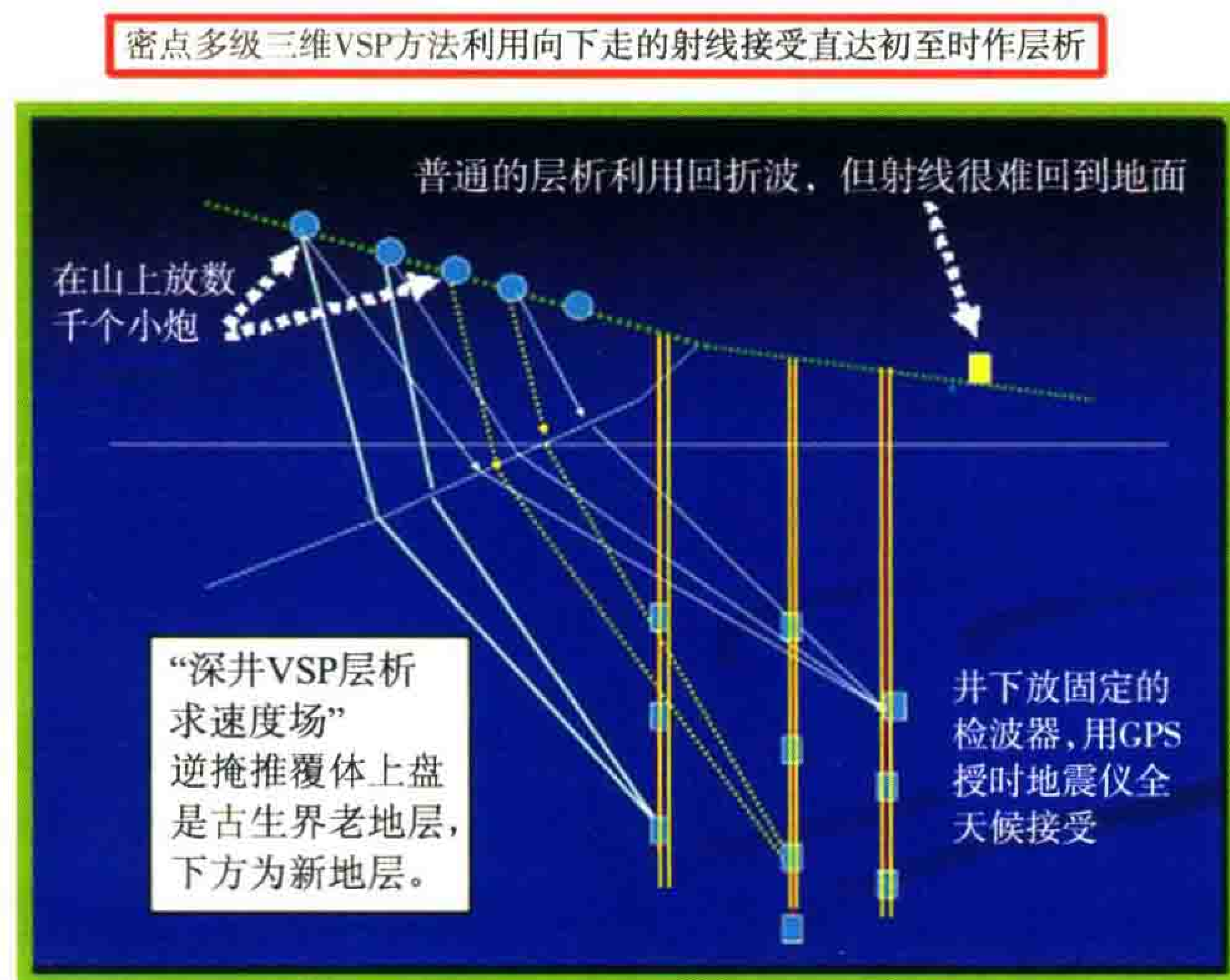


图 41　深井 VSP 层析求速度场原理示意图

如图 41 所示，"深井 VSP 层析求速度场"的具体方法如下。

在复杂山区，找 3～5 口低产井或报废井，把多级井下检波器下到不同深度上，推靠井壁。在井口安置 GPS 授时地震仪，无人值守，全天候接收地震记录。在山上用放小炮的办法，用 0.5～1 kg 药量，放上几千

炮(要用 GPS 授时爆炸机)。接收直达初至波,然后采用层析方法根据几万条射线数据,推算出整个山体的速度场。

这个办法在窟窿山应该是可行的。前年我提出来后,至今还没有人支持响应。

(4) 激发方式的改进还是头等重要的——"关键在于水"。

我们放了几十年的地震炮,其实对激发地震波的理论还与实际有很大的距离,在山区勘探中我们还没有进入自由王国,西部山区如何放炮?南方碳酸盐岩出露区如何放炮?有人说泥岩里放炮好,有人说砂岩里放炮好,在西部山区存在巨厚的低降速带,更不知道合理井深是多少了,野外队只能盲目地用同一个深度放炮——我们现在还不能称作"科学放炮"。

我认为炮井中激发地震波能量"关键在于水"。不管你是砂岩还是泥岩,只要充水饱满就是良好激发岩性。只要充水不足,有空气存在,炸药爆炸能量就会变成对空气的压缩,不能有效产生弹性震波。

低洼处选炮井,炮井灌水,雨季雨后施工,都有利于激发弹性能量。

图 42 是准噶尔沙漠同一地点在不同季节用统一激发因素条件下的单炮记录的分频扫描结果,明显可以看到 4 月里,地表雪刚化完后施工,可以得到最好的记录。可见含水对放炮记录的影响至为重要。

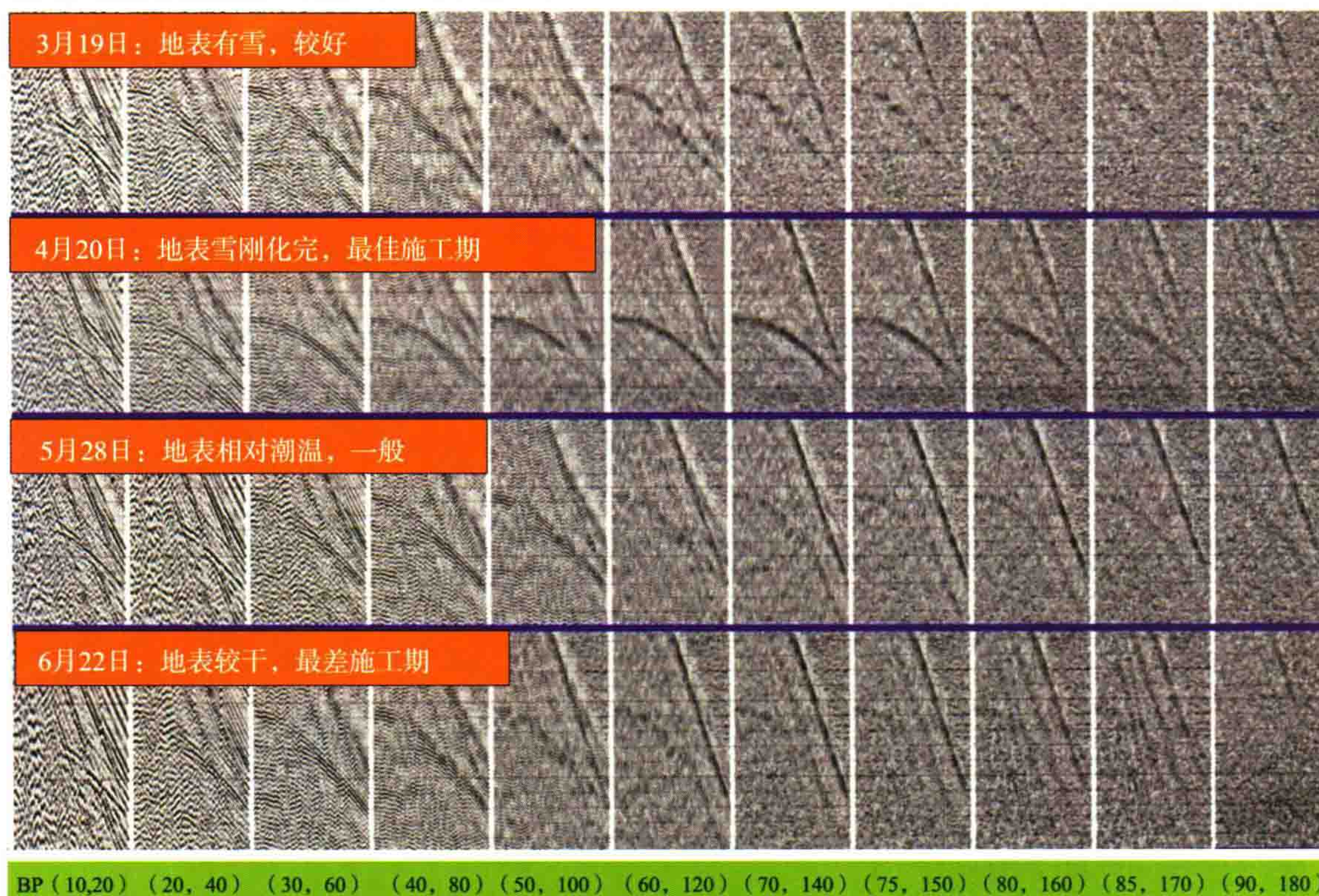


图 42 不同季节施工期记录效果对比

为科学决定爆炸井深,我们在青海用空气钻钻炮井时,用返出的岩屑称重、烤干、测定含水量,并配合简易电测井的方法曾经取得成效,可惜还没有人加以总结推广。

放炮前向井中灌一桶水可能记录就有本质的变化,加上放炮时闷井会更好。

(5) "万道 GPS 授时地震仪"要在我国西部山区推广。

"万道授时地震仪"在山区做地震,通行无阻,首先应在鄂尔多斯黄土区获得突破。

GPS 授时地震仪在山区及黄土塬三维施工中,可以方便灵活地布设炮点及接收点,减少劳动量,提高功效,节省开支,唯一的缺点是当天不能看到监视记录。在几万道施工的情况下,个别站不工作不用怕,无非是局部覆盖次数的减少而已,这需要扭转人们的思考方法。其实国外现在都正在研制这种仪器,例如

ION 的萤火虫 Firefly。而目前我们有专利的适合山区施工的“GPS 授时地震仪”却无人问津，我看是由于人们当天不能看到监视记录的习惯思想阻力起着作用。

科技进步日新月异，我们更可以插上卫星遥感、卫星通信、超高速计算机的翅膀了。现在一个 16G 的 U 盘很便宜，我们的 GPS 授时地震仪应当可以上马了。

(6) 应该重点研究高频噪声的产生机理

从分频扫描的结果来看(**图 27**)，很明显，高频端信噪比上不去的主要敌人是高频随机噪声！

我国东部地区的研究重点应该放在对高频噪声性质的本质上的认识，高频噪声到底是怎么样产生的。什么是“耦合谐振”，什么是“脱耦乱振”，如何埋置好检波器，如何降低高频噪声的理论还不清楚。

所谓“脱耦乱振”，我指的是 70 Hz 以上的高频噪声在 0.2 m 道距的超小排列上相邻道波形呈现为道间不相关的现象。参看我 1998 年文章——《高频随机噪声的三分量测定》[《石油物探》，1998，37(1)：1-13](图 43)。

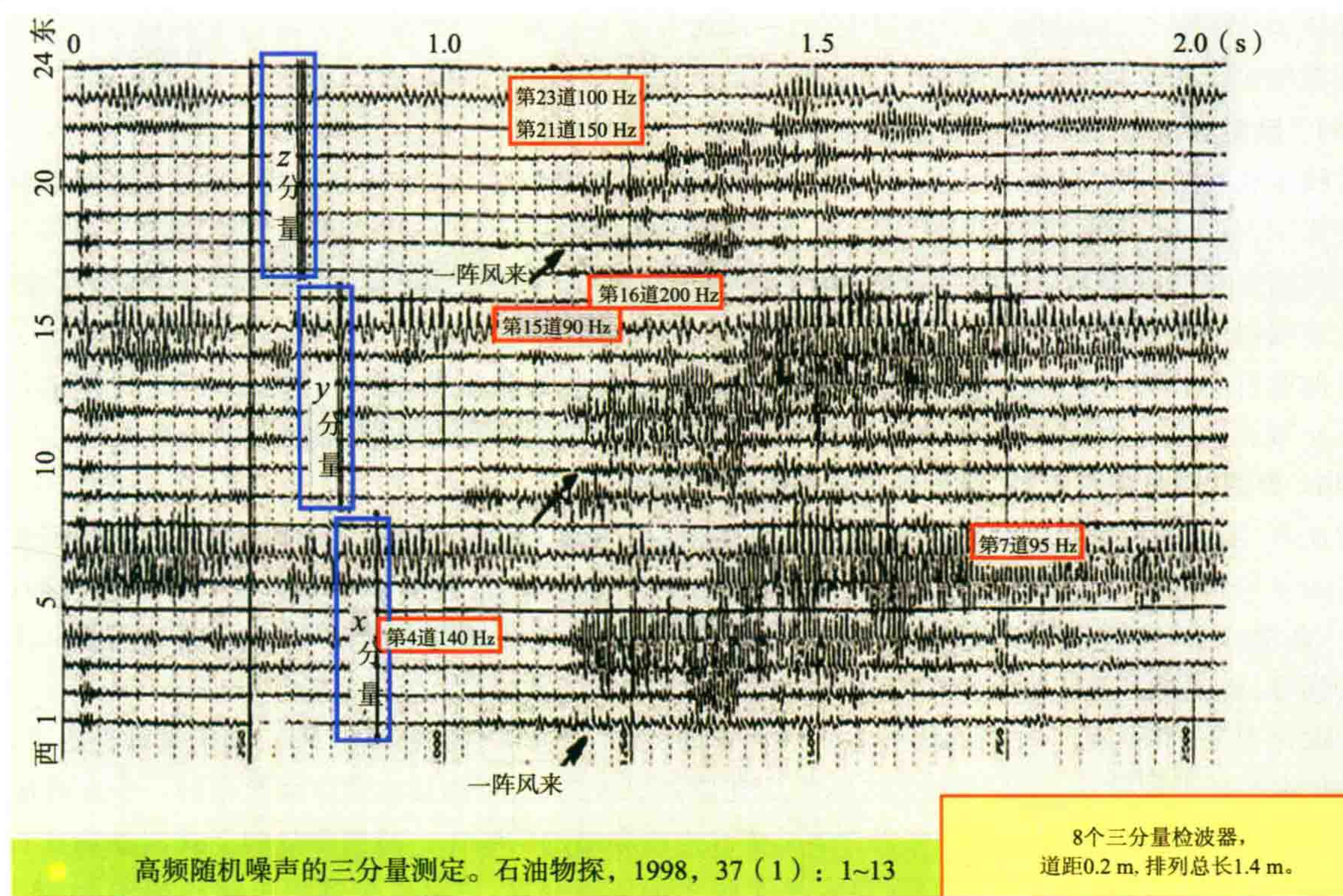


图 43　高频随机噪声的三分量测定

8 个三分量检波器，道距 0.2 m，排列总长 1.4 m。一阵风吹过来，连续震动约 1 s，埋置不好的检波器大跳得厉害。我称它“脱耦乱振”，每个检波器的主频不同，波形相邻道的波形也不一样。

资料处理方面有不少课题等着我们去攻关，主要是我国西部地区低信噪比及复杂速度场的世界级难题。

(7) “多域判噪，合并执行”的噪声压制方法。

地震噪声(尤其是随机噪声)与信号在所有的域里都有难分难解的交混区域。单域去噪是片面的，它会损害有效反射波，并且产生“假信号”。今后应该抛弃单域去噪，实施“多域判噪，合并执行”。即把每个域中去噪所得的噪声模型建档，分析其“共同部分”最后合并执行，将其去除。这样可以避免“乱杀无辜”。当然这并不容易。

(8) 改进西部低信噪比地区的地震偏移成像质量。

除了上面提到的偏移速度的准确性起着主要作用，需要突破用“深井 VSP 层析求速度场”的方法之外，另外一个需要考虑的是如何用好偏移孔径。

在当今积分法偏移过程中，把无数绕射点源的能量收集起来的过程中，必然同时加进许多噪声(偏移处理过程中还有偏移噪声)，严重时会使成像模糊。“偏移孔径”愈大，问题愈严重。在信噪比较低的地区，掌握合理的偏移孔径是个大问题。中科院杨长春那里有很好的例子。

四川也有“定向偏移”，但必须事先大致知道地下倾角的分布。缩小“偏移孔径”走过头了就回到几何地震学的范畴，所以要掌握分寸。我的观点是，对于海上及平原区的高信噪比地震资料，无疑应该采用建立在波动地震学上的绕射点的成像方法。只有我国西部低信噪比地区，才不得不采用折中方法。关于“偏移孔径”的研究尚待深入，最好能研制出既能收集到绕射能量，又能避免加进噪声的成像方法。我过去曾建议博士生李莉研究“自适应定向孔径拟合加权叠加偏移方法”，即在每个绕射双曲线轨迹之上(或在成像道集中)，先不忙把数据相加，要根据菲涅尔半径大小，用两个菲涅尔直径筛选定向反射能量区，判断其能量分布，做相应的平滑滤波，用自适应获得各道上的加权系数，再将绕射双曲线轨迹上的数据做加权叠加，获得偏移结果。

我认为这将是今后偏移技术的改进方向，它既符合波动地震学的原理，又可避免噪声的干扰。当然这种做法是振幅不能保真的，只能在西部低信噪比地区使用。

(9)“数据规格化”是改善处理质量的重要措施。

要研制快速而有效的“数据规格化”方法，它可以加密数据网格，同时起到去噪的作用，这对后续处理起重要作用。

不规则采集的数据通过内插、重新采样组成均匀、规则、高密度采样的数据体，可避免“脚印”，减少“划弧”，改进偏移成像质量。

目前通过 DMO 及反 DMO，可以把不规则的采集资料内插成规则，均匀的数据，但是计算工作量太大。*F-X* 域道内插方法的应用范围有限制，需要研制快速而有效的新的“数据规格化”处理方法。

(10) 改进“随机噪声衰减”模块保护高频信号的功能。

现在的“随机噪声衰减”模块 RNA(FXDECON)只能“锦上添花”不能对高频段“雪中送炭”，因为 *F-X* 域中各频率的预测算子是独立分别计算的，高频部分噪声比信号强，预测算子计算就错了，导致牺牲了高频信息，并加进了“假信号”，反而有害于分辨率的提高。根本性的解决方案是“频域外推”，需要利用中频段优势信号，把预测算子外推到高频去。

在改进 RNA 模块保留对高频信号的真实性方面，过去国九英、周兴元的《*F-X* 算子频域外推方法》及河南油田朱生旺的思路还是很不错的方法，今后还应加以改进，这是拓展高频信噪比谱的一个正确途径。

想提高地震资料分辨率的主要努力方向是要改进高频端的信噪比。高频部分的干扰波往往具有随机干扰的特性，通常使用的 RNA(FXDECON)是个强大的压噪程序，它可以把随机干扰压制到 3～6 倍，但是剩下来的 1/3～1/6 的部分就是“道间相干”的“假信号”，它们与真信号无法区别，难以在后续处理中消除掉。

如果某一个高频频率范围的原始信噪比小于 1/10，则一般在室内处理过程中是无能为力，很难挽救的，可见通过室内处理的压噪手段想扩展“有效频带”的能力也有限的。我见到有人通过“三高”处理，可使 2.5 s 处的反射波主频达到 250 Hz，这纯粹是在制造假分辨率。

此外，还有许多方面需要我们深入研究，例如，什么样的采集密度算高密度。

我做了一个试验，如图 44 及 45，图 44 是地下 6 个绕射点源，相距 50 m，埋深 1200 m 的正演地震反射波形。图 45 是不同输入道距采样密度的偏移成像结果，输出道距则统一为 25 m。由图可见，道距 100 m 时，成像不好，偏移噪声很大，当道距为 50 m 时，6 个绕射点已经可以分别成像了，再加密道距道到 12.5 m，成像质量相同。**这说明道距加密到一定程度，就不能再改进成像质量(信噪比低时有些差别)，这个例子是二维的情况。**

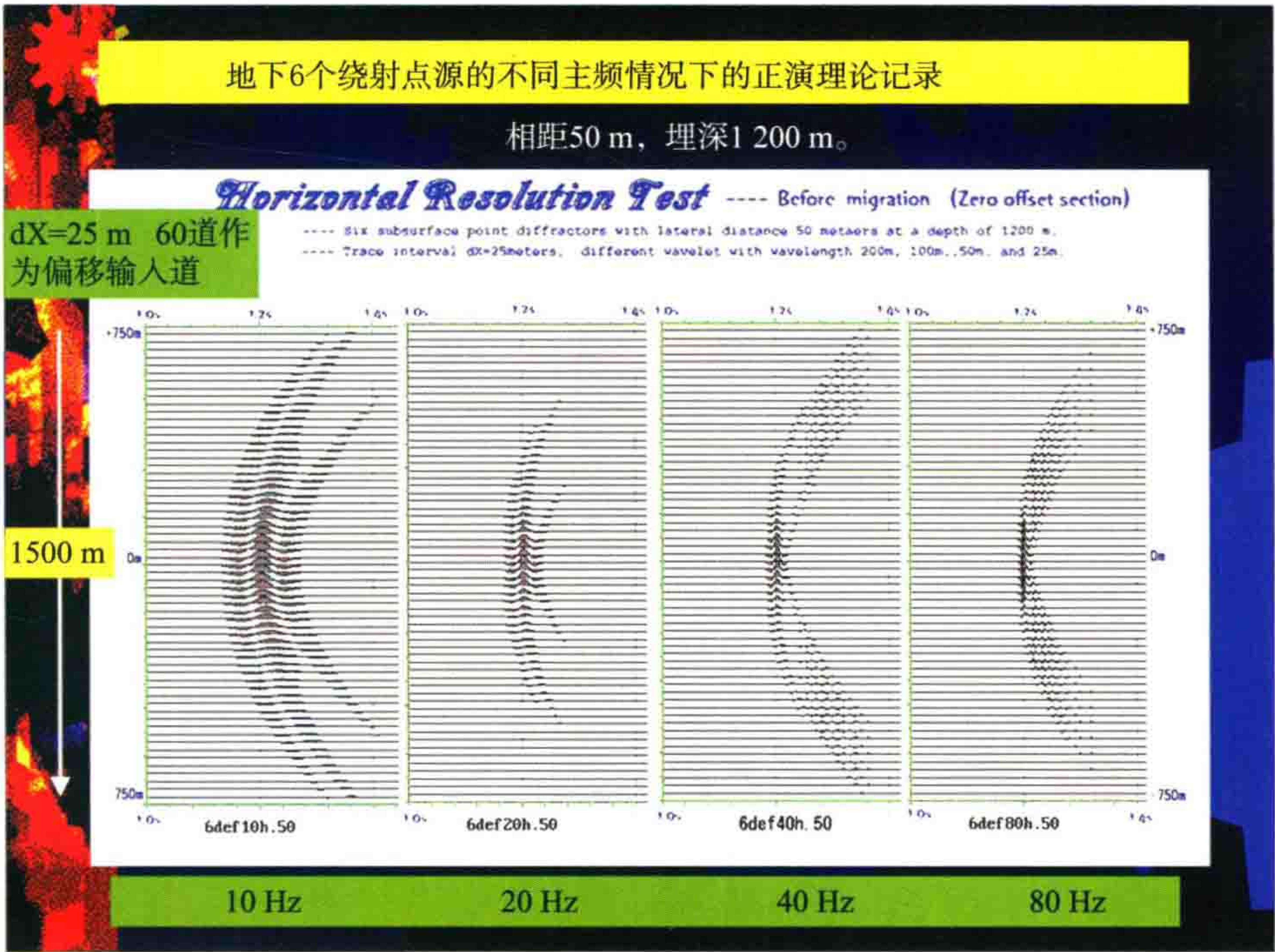


图 44 地下 6 个绕射源的正演理论记录

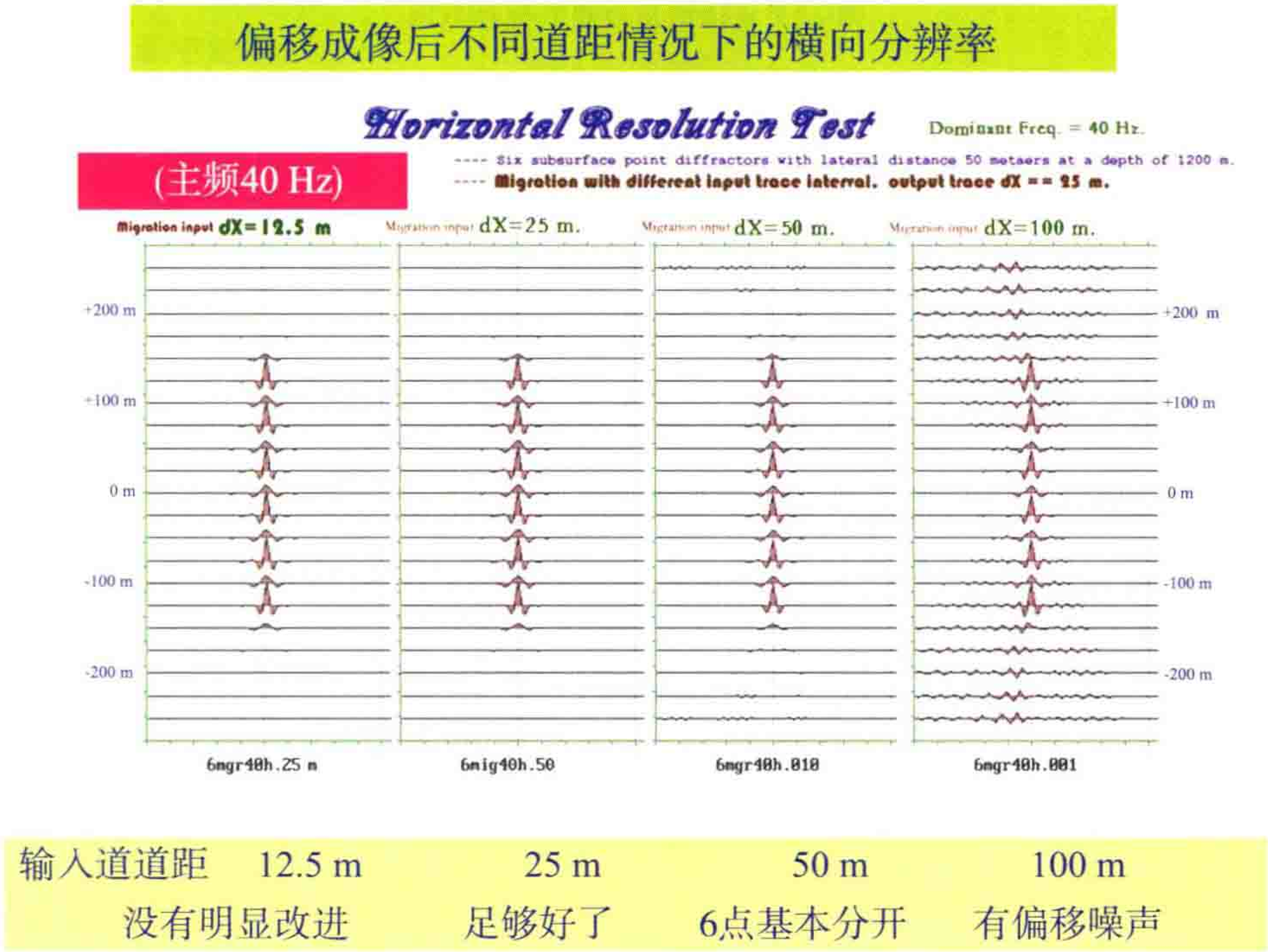


图 45 不同道距采样密度偏移成像结果

可能今后要从地下成像质量反过来衡量采集及处理参数的合理性，可以考虑的问题如下。

(1) 地下 1 个点的反射信号到达地面成为几个菲涅尔带的一大片。

(2) 光靠野外加密测点距并非必要，关键是看偏移成像后的效果。

(3) 成像质量决定于偏移范围(大致两个菲涅尔带直径)内：① 参与偏移的道数；② 分布的均匀性；③ 频率成分；④ 相应的信噪比；⑤ 偏移速度的准确性。

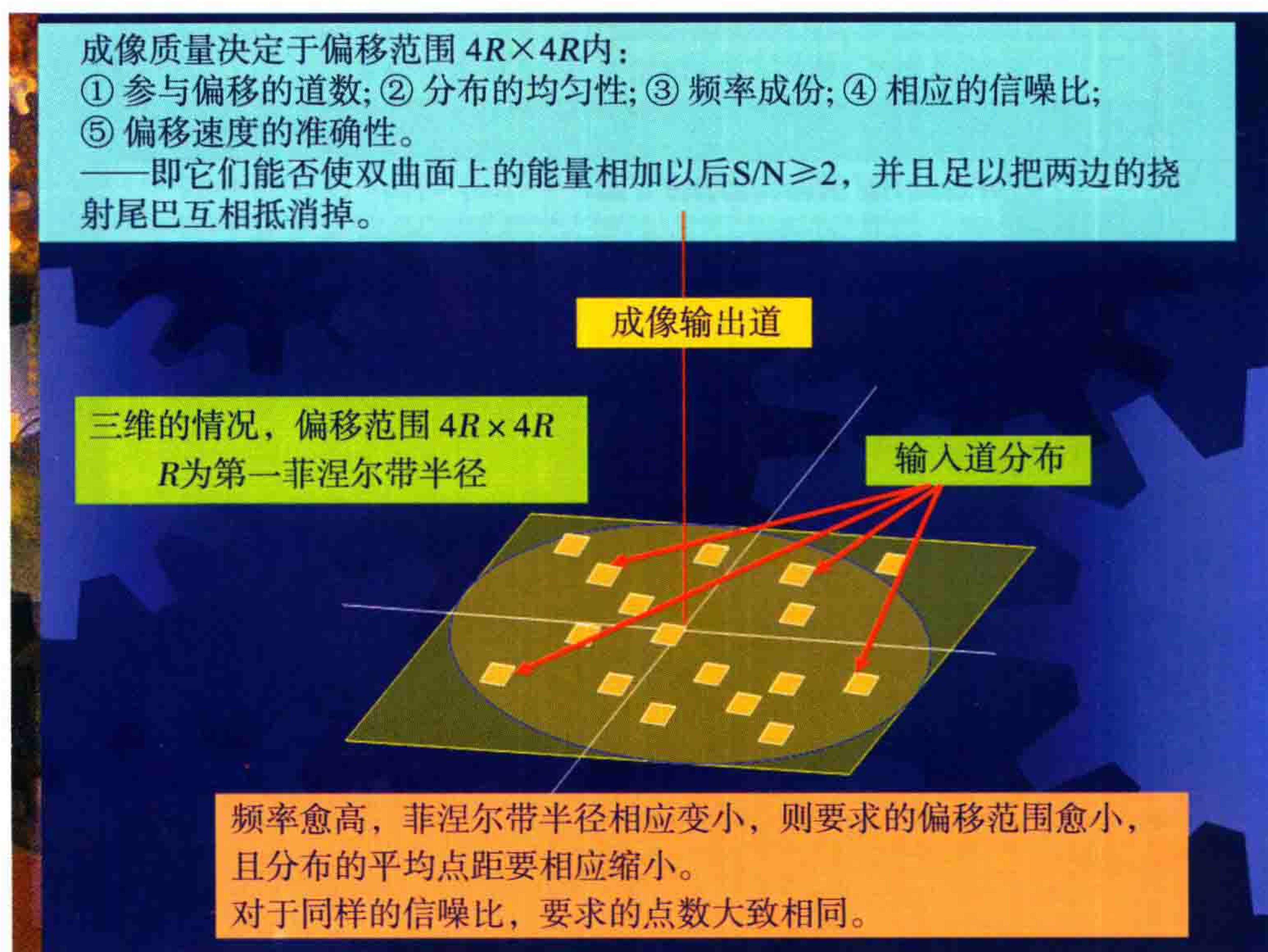


图46 成像质量决定的偏移范围

(4) 分布的愈均匀愈好，为照明度的补炮对水平叠加是好事，但对成像可能是坏事，增加了偏移噪声。

(5) 对于叠前偏移，本来不需要面元BIN的概念，直接由每炮每道的实际炮检距作输入就可以。**但是如果野外采集系统中已经使用了较粗的面元，那么除非采用道内插或数据规格化手段，否则不能得到很好的成像效果。今后要注意，覆盖次数降低些，换得面元更小，在野外工作量基本一样的条件下，就可以改进偏移成像质量。这也是钱荣钧同志最近不断呼吁的。**

以上所列前面"7点遗憾"呼唤着我们的求实态度；后面"10个方向"呼唤着我们的创新精神。当然，我的发言肯定很局限。今后国外的新技术我们还是要努力学的，要发展的，我这里只是强调我国地震勘探道路上的重点问题。总之，今后我们物探技术进步及健康发展，靠的是"求实与创新"。

三、体制及机制方面

我还想就体制及机制改革方面谈些意见，因为它也在严重影响着物探事业的发展。

20世纪90年代末，我国体制改革进入攻坚阶段，国务院听信经济学家吴敬琏考察外国石油公司所得的经验，提出体制改革意见：在石油行业中实行外国的"油公司模式"，把物探、测井、钻井排挤出石油公司。这是很欠妥当的，不符合我国的国情。

国外的油公司是老板自己掏腰包找的油田，我国的油田是物探、测井、钻井的工人辛苦了大半辈子得来的。这倒好，把物探、测井、钻井排挤出油公司，采油的和卖油加油站的人倒反过来成了当家的主人。这能合理吗？

20世纪90年代末，中石油推行把物探推向市场。改革出台新政策后，"油公司模式"使物探工作量削减了一半多，油公司还使劲压低施工价格，物探局差一点维持不下去，生存困难。

1999～2000年，总人数约25000的物探局共计买断加提前退养职工10000多。技术人员大量流失，人心涣散。当时的物探局一下子由"先行官""皇家部队——御林军"变成要饭的，成了油田的"长工"甚至是"短工"，要你来干你就来，不要你干你就走。

多亏塔里木勘探指挥部邱中建和贾承造二位以"战略伙伴关系"的救助,答应每年保证以80%的物探工作量固定交给物探局,这才使物探局免于垮台,支撑了这支队伍。否则我们今天也不能在这里纪念物探事业的60周年了。

有些事业不宜推向市场,例如把医疗卫生事业推向市场,造成我国老百姓目前看病难,药品贵,看不起病的痛苦。石油物探工作不是简单的商品,它又牵涉到国家重要的资源及经济命脉,不应当轻易推向市场。

其实都是国家出的钱,为什么非要先交给油田,再由油田甲方来卡乙方呢?他们少做物探就省下钱归他们油田自己,当然对物探的积极性不会很高。

2005年,中石油总公司领导层发现"物探、测井、试井、钻井等油气服务性行业"的重要性,在十三陵会议中心召开专门会议,会上重新明确提出:物探是"找油找气主力军",并在各方面支持物探局的技术进步。这才部分扭转了被动局面,但是也并没有改变物探公司低声下气当长工的地位。物探人辛苦找出的油气,功劳全归油田甲方。

我认为我国应该废除物探的甲乙方合同制度(一个企业内部本来就不能允许进行商业运作,国外各大公司多是如此)。既然物探是"找油找气主力军",那么就应该由国家或总公司层面来统一管理:统一拨款,统一部署,全国归一化领导——"油公司模式"不适合我们的国情。

想当初为了油公司上市,搞了"股份与承续"两套班子,机构重复,互相牵扯,现在不是也改回来了?所以"油公司模式"我看也应该改一改,把主力军请回"皇家部队"。

对国外承包当然还可以沿用甲乙方合同,因为人家给的施工价格是到位的,并且市场运作是比较规范的,同时他们也没有要求我们当红色承包商。

再说甲乙方的改革中的弊病。

甲方要求施工价格愈低愈好,这没错,但是当工作难度增加了,技术装备及工作量增加了,钱不多给,"我每年投资不能增加,你不干我找别人干"。乙方为了挣饭吃,低声下气,只能表态:我高明,我能干!挣来的钱只能维持生计,缺乏技术更新的自我完善机制。

因为乙方不知道明年在哪里干活,不可能事先针对工区的特点做好技术准备和攻关准备。更不要说会像20世纪90年代物探局对塔里木盆地那样用主人态度,利用多年的调查资料,全面地编制低降速带潜水面数据库和叠加速度库了。大家知道,这些数据库是后来塔里木中部大沙漠里地震资料,之所以能够准确寻找低幅度平缓大构造的技术关键,**国外还没有一个盆地做过这样的工作。**

再有,20世纪90年代物探局为了改进塔里木的资料质量,在山地施工中自己研制世界上最轻便的山地轻便钻机。当时自掏腰包,给山地每个地震队配备二三十台,每增加一台钻机就赔30万元,被邱中建院士誉为"红色承包商",今后恐怕很难再有"红色承包商"了。

承包解释任务的乙方无法知道采集处理的过程,钻井测井资料也不允许收集齐全及积累,这不利于采集处理解释一体化的形成和经验理论的提高。

这些方面都极大的影响物探技术的进步和健康发展。

目前物探行业的甲乙方合同制度实际上没有起到好作用。乙方动用了不少技术骨干跑市场,忙于请客吃饭。为了寻找工作量,也只能靠宣传"洋设备和洋技术"来争取能中标(国产仪器和土办法肯定不行)。所以,我上面所提的7种遗憾和不求实际的"忽悠",也就是由甲乙方不正常的机制产生的,它是根源。

20年前的体制改革已经造成了许多负面影响。但从反面意义讲,这也促使东方地球物理公司走出国门,去寻找活路,绝处逢生。目前BGP已经主要依靠国外收入谋求生存了,通过多年的努力,它已经成为当前世界陆上物探公司的第一位。"凤凰已经涅槃"了。

我的这些意见不一定对,有些过于偏激,但这都是我长期思考的问题,在庆祝我国物探事业光辉的60年的日子里有感而发。希望大家指正。

最后,我坚信通过物探工作者的艰苦的努力,我们找油的本事会愈来愈高,今后会有一个更光辉的未来。

与石油大学（北京）地质科学系师生唠唠成才问题

这是 1996 年 10 月，我奉中石油总公司人教司之命，到昌平石油大学(北京)[今中国石油大学(北京)]去作的一个报告。

当时，"互联网"才刚刚兴起，"信息社会"这名词才出来。我在会上提出"Information 不等于 Knowledge"，有了广泛的信息，还要通过大脑加以分析、判断，消化吸收，然后才有正确的认识。这种认识才能称得上知识。

进入信息社会之后，人们素质的好坏将体现在能不能正确地利用信息，即善于分析判断的能力。而这个判断能力，却是依靠人们平时的知识积累，尤其是实践经验的丰富程度。而人们知识和经验的积累靠的是"勤奋"和"有心"，所谓"书山有路勤为径"，"功夫不负有心人"。

只要你是个有心人，不断地积累有关专业知识，那么知识的积累就会像滚雪球一般，愈滚愈多，这样你就可能成为这方面的行家。一个行家对新来的信息会分析得更加"入木三分"，这是因为行家头脑里的"联想库"特别丰富，能够"举一反三""触类旁通"，因此他们的判断能力特别强。

后面我讲了数学与物理的关系，计算机与人的关系，人才成长与精神因素的关系。

我作报告后的第二天，我到石油大学图书馆一看，那里看书的学生十分拥挤。我深感欣慰。

人教司要我到这里来作一个报告，我感到这个任务很难完成，但是也只能硬着头皮来了。

近年来我接触到一些研究生并看了一些他们的研究论文，时常有所感触，于是写了下面 4 个部分的不成熟意见，想和大家一起讨论，请大家给予指教。

一、信息与学术研究的关系

当今世界的热门话题是我们即将迈进一个信息时代，电子计算机的普及和信息高速公路的兴起将要和正在改变我们的日常生活方式和社会活动方式。

我相信借书不出门、购物不出门、远程医疗、远程教育、电影点播、"身临其境"等等都是可以实现的。并且信息产业革命也将会促使商业和制造业加快发展，带来经济的高速发展。

但是我想表达的是解决了信息的渠道并不直接意味着知识的增长。例如，图书馆的馆长并不一定是通晓一切的万能博士，有了国际互联网(Internet)，你可以获得非常广阔的信息来源。但是，即使你能"一目十行"，甚至"过目不忘"，你也不一定能够成为万能博士，因为这里面有一个消化、理解、综合判断、去伪存真和抽象总结、升华的一系列思维过程。

做生意的人最懂得信息的宝贵，炒股票的人更是这样。只要早一天，甚至早两小时知道某些行情信

息，就可能有发财的机会，因此他们便是信息社会中第一批得益者。然而对我们搞科学研究的人来说，主要还不在于快速获取信息，而更应着重于对信息的加工，即需要看懂某些文章，掌握、利用并改造、发展它。

当今电视节目里各种化妆品和减肥营养素的广告简直多得出奇，它们都说自己有着灵验的效果，看得人们不知道该买哪一种好。所以信息来源多了还得靠人们去判断、实践并加以认识和提高。同样，我们地球物理勘探的发展道路上，近年来各种各样的新技术、新方法层出不穷。翻开我们的专业期刊，你可以看到各种人工智能，神经网络，小波分析，模糊数学，模式识别，聚类分析，分形、分维，模拟退火，层析反演(CT)，混沌反演，甚至还有应用进化论的遗传算法等。真是琳琅满目，目不暇接。这一方面说明我们地球物理勘探技术正在向纵深发展，另一方面也的确使人感到新技术使我们眼花缭乱，有点无所适从了。尤其是最近几年我们地球物理勘探的队伍中，由于受某些商品经济中不良思潮的影响，出现了一些骗人的江湖术，它们所传播的就是一种错误的信息，这种信息不能指导我们的找油实践。因此在众多的信息来源面前，我们搞研究工作的人首先应该加以综合消化、分析判断。

在人们获得知识的过程中，“兴趣”和“有心”起着很大的作用。让不同的人读 10 min 报纸，他们各自的收获是不同的。喜欢文艺的人，对艺人的趣事一下子记住了；喜欢体育的人，对马拉多纳的消息记得特别清楚(我看过就忘)。同样的情况，我们听老师讲一堂课，每人的收获也是不一样的。你对英语不感兴趣，你听完就忘；你对物理和数学有兴趣，你就记的很牢。

所以我认为：丰富的知识靠积累，积累的好坏靠“兴趣”和“有心”。兴趣靠熏陶和培养，即从你的长辈、亲友和老师那里得到熏陶；从你对家庭和对社会的“责任感”培养你成为“有心人”。

信息只有通过大脑艰苦而复杂的劳动，才能转化为人们的知识。即使有些信息是别人直接的经验总结，也需要我们学懂它，才能转化为自己的知识。

知识积累有多种方法。在长期的学习过程中，我养成了剪报的习惯，把各种报纸杂志上我所感兴趣的文章剪下来，收集在一起，过些时日把他们连贯起来想一想，这样便有利于知识的积累。有了知识的积累，才能触类旁通、举一反三，才有某些综合判断的能力。

在阅读自己订阅的专业期刊文章的时候，我喜欢在每篇我读过的文章边上直接记下我的读后观感，并且把文中存在的问题和我没有搞懂的地方醒目地写在旁边。这样做能使我更深地理解文中的实质，并且在日后我要用到它的时候，不需要重头来读懂它。

针对某篇文章内容牵涉到某些专门领域知识时，我就根据它参考文献中所列的主要文献，进一步学习一些专著。这样的学习能够马上学以致用，容易深入下去。对一些理论试算结果有怀疑时，我就自己在计算机上编一个程序，加以验算论证。这样就可以促使自己的认识得到提高。

长期搞综合研究，坚定了我对地球物理勘探技术的执著追求。我毕业于物理系，对地质解释方面过去没有学过专门的知识。于是我抓紧一切时间自学构造地质学、大地构造学、沉积岩石学、地史学等。大庆会战期间，我开始搞地震方法研究，又下决心在数学方面再打些基础。在出差小队的过程中，在汽车、火车上，我抓紧一切时间自学复变函数、数学物理方程等课程，总觉得一天的时间不够用。

“循环记忆法”在年青时代帮助我学习外语十分有效，因为它符合大脑记忆的客观规律。1952 年大学毕业后，参加 1 个月的俄语速成班，每天记 100 个新生字，用“生字卡片”，正面是俄文，反面是中文，反复循环记忆。把昨天的字复习一遍，忘记的字当作“顽固字”，挑出来第二天再记忆一次。1 个月后，我们拿着字典就可以作专业俄语的翻译工作。

认真地做好分类笔记也是十分重要的，记笔记的过程是一个消化和加强记忆的过程，也就是一种“循环记忆法”。我对所记的笔记注意加以复习，用彩色铅笔加做标记，这对进一步掌握其内容很有效。计算机普及后，将来即使有了数据库，我想或许还需要在库里有自己的“分类的笔记本”。

我发现，夜深人静的时候把白天没有解决的事情再冷静思考一番，所谓“过电影”的做法，常常得到豁然开朗的新路子。我一些好的思路几乎都是在夜深人静的时候想到的。**只有冷静地反复思考，才能思考得深入。**

当然，我在这方面做得还是很肤浅，但我感到这种做法对自己知识的积累十分有益。

在人类认识过程中，各种信息都需要用人的大脑加以分析、判断，然后才有正确的认识。这种认识才能称得上知识。所以，信息是知识的来源，信息不完全等于知识，Information 不等于 Knowledge。

而每个人综合分析判断能力的大小决定于以下几个条件。

（1）有坚实的基础知识（数、理、化等和社会科学知识）。

（2）掌握较丰富的专业知识。

（3）有丰富的阅历及实践经验。

（4）有正确的思想方法（其中以独立思考与实事求是两条最为重要）。

总起来说，我感到当我们进入信息社会之后，人们素质的好坏将体现在能不能正确地利用信息，即善于分析判断的能力。而这个判断能力，却是依靠人们平时的知识积累，尤其是实践经验的丰富程度。而人们知识和经验的积累靠的是“勤奋”和“有心”，所谓“书山有路勤为径”，“功夫不负有心人”。

只要你是个有心人，对你从事的工作感兴趣，不断地积累有关专业知识，那么知识的积累就会像滚雪球一般，愈滚愈多，这样你就可能成为这方面的行家。一个行家对新来的信息会分析得更加“入木三分”，这是因为行家头脑里的“联想库”特别丰富，能够“举一反三”“触类旁通”，因此他们的判断能力特别强。

根据以上的认识，我希望搞地球物理专业的本科生和研究生们能够在学校里学好基础课及外语，打下扎实的基础。在此基础上再在专业课程中力求扩充知识面，并多多接触实际。在实际生产问题中找课题，用自己所学的知识来解决实际问题。在实践中长知识、长经验，这样才是今后信息社会中有用的人才。

二、数学与物理的关系

在自然科学的发展道路上，数学与物理这两门学科始终是相辅相成、联手前进的。

古代几何学的兴起是与尼罗河泛滥后的土地丈量问题有着密切关系的。17 世纪，牛顿和莱布尼茨各自独立发明了微积分，也是由于客观上人们需要研究，诸如加速度，切线方向，球的体积，极大、极小值的求取等一系列日常问题而产生的。1864 年，麦克斯韦在法拉第电磁感应实验的基础上，用数学方法总结出两组偏微分方程，定量地刻画了电磁场的转化与传播规律，从而证明了电磁波在真空中以光速传播，并且预言光波就是电磁波。这是数学与物理结合、相互推动的极好例子。

1930 年，狄拉克列出了电子运动方程后，从数学公式中推断了必定还存在着一种“真空中的空穴”，后来被证实是一种“正电子”粒子的存在，这是数学反过来推动了物理学的发现的例子。

那种纯数学的研究一般不容易取得较大的成就，只有极少数例子，例如俄罗斯的罗巴切夫斯基摈弃了古典几何学中的“平行公理”，创立了非欧几何学。后来黎曼发展了它，形成了黎曼几何学新支。过了几十年，非欧几何学一直没有引起人们的注意。直到 1915 年，爱因斯坦在研究广义相对论的时候，使用了黎曼几何阐明了物质空间的弯曲现象，数学又推动了物理的发展。

然而一般情况下，脱离了物理现象的纯数学的研究是没有多少生命力的。

地球物理勘探从数学中获得了很多的好处与促进。地震勘探及近年来的重磁电勘探都已经进入了数字处理的崭新阶段，并且都已经和计算机产生了不解之缘。尤其是地震勘探正在使用大规模的并行超级计算机，各种数学分支多数已经深入地震勘探从资料采集、处理，直到解释的过程中。所以大专院校及研究生们对各种数学工具产生普遍的兴趣是很自然的事，也是好事。

我在这里只是想强调数学应该与物理真正的结合好。就我们搞工程技术的人员来说，我们应该在物理的现实基础上去寻找能够解决我们课题的数学工具。而不是从数学出发，到处套用到各种物理课题上来。有时人们就忽略了物理的本质，只去乱搬数学工具，写了一大堆公式和引用了不少新名词，看起来学问挺高深，实质上不解决问题，这种论文是没有生命力的。

物理学的发展离不开数学的帮助，但是我们在应用每一种新的数学分支时，必须不要忘了它所包含的

物理意义，否则就容易出偏差。今年我对如何正确使用分形、分维技术的评论文章就谈了我的这种观点，见《石油地球物理勘探》1996 年第 1 期。

分形、分维技术只能用它来“描述”复杂的物理对象，而不能用它来“预测”和“洞察”复杂的微观对象。因为也不能指望用它最终来解决油藏开发中的“非均质”问题，最多只能对“非均质”现象做某种假设及估计。

人们用分维数来判断含油不含油的时候，不能忘了地震记录波形中始终是存在着高频噪声的。因为分维数的大小实际上主要由高频噪声决定，所以不能用它判断含油性。当我们用分形来做地震道波形内插时，必须想到地震波的高频信息实际上不可能由中、低频信息来推算。因此所谓用分形技术来提高地震分辨率的想法是不现实的，它们实际上是在人为地制造假分辨率。

以上讲的内容其实质也就是理论与实际如何结合好的问题。数学是抽象化了的理论，我们在使用数学公式的时候一定要理解公式所代表的实际物理意义。

数学是美好的，但不是万能的。我们应该善于在实际的物理课题中去寻找解决问题最得心应手的数学工具。这样做，才会促使你在掌握数学工具方面学得更快、用得更准确。

三、计算机与人的关系

计算机的功能愈来愈强，许多过去做不到的事情（例如叠前偏移）它可以做到，无疑地会造成一种错觉，好像机器比人厉害。现在下象棋的高手已经有时败于计算机的手下。近年来呼声愈来愈高的“人工智能”与“神经网络”更是风行于我们石油物探的许多领域。这是好现象，但是我们还是应该清醒地认识到，计算机和先进的软件是人制造的工具，它不可能比人更聪明（至少最近几十年里它还不会比人更聪明）。

有人以为计算机的神经网络系统有“自学习”的功能，你只要提供给它有油和无油地方的地震道波形，机器就能自动地分析 20～40 个参数，从而“学会”判断含油气的本领，进而预测那里有油。这便是近年来多参数神经网络油气识别的基本思路。这种方法在不同的油田上已取得某些效果（当然也有失败的例子），许多地质家对此十分感兴趣。

我曾经问一个专家：“在你这个地区地下含油气以后，地震反射波形上到底有什么反映？到底那种参数起主要的作用？”他回答说：“地震反射波形有什么反映我说不清，但有些肉眼看不出来的波形差别，电子计算机能够分析出来。”

这可能有些道理。但是对于人看不出来的波形差别，一味信赖电子计算机能够看出来；连人都讲不清含油气后的差别在哪里，却完全信赖机器能来做判别，这恐怕是一种危险倾向。至少我们应该问一下：这种判别的理论依据是什么？

常言道：“知其然，还要知其所以然”，这才是正确的认识论。根据我对含油气后的地震信息变化的研究，认为主要起作用的是振幅的差别、波阻抗差别和 AVO 异常。其他信息的差别可靠性很差，例如，频率参数是多解的，地层吸收系数是永远求不准的，分维数主要说明干扰波的强弱，层速度的精度太低，自相关函数与频谱分析的主要参数互相关非独立。所以，我怀疑你用 40 个参数有什么用处？请注意，无效的参数加在数据中让计算机去“自学习”，是会出现坏效果的。

1952 年，我在新疆做重力勘探，我队上的一位司机对我说：“我知道怎样能找到石油了。”我请他指教，他说：“地面的山头颜色发红便说明地下有油。”我一想，果真新疆、酒泉的油田都有红色地层暴露地面，这位司机的认识是有一定道理的，但后来在野外多走一些地方，就发现其实不少红色地层出露的地区地下却没有油。因此他的结论只是一种感性认识，并没有上升到理性认识。地面有红色岩石出露并不直接与地下含油气有着“内在的联系”——后者是十分重要的。

还有一位地质家研究“沙漠与石油”的关系。从现象上看问题，好像上帝偷偷地把石油的储量都埋藏在沙漠的边上了，世界上从沙特阿拉伯、伊朗、伊拉克到北非都是富含石油的地区。但当人们冷静下来一

想，地球上这些沙漠其实一直到第四纪末期才开始形成，它们与地下的石油储量并无内在的联系。

那么，如果我们把“红色岩石出露”或者“沙漠”作为参数来让计算机的神经网络来做含油气判断的话，在中东及新疆可能取得某些成功，但其实这是没有道理的，并且用到其他地区就会错误百出。

所以我曾强调，人们必须首先搞清含油气后到底会引起哪几个参数的改变，使感性认识上升为理性认识，人们才不至于陷入盲目性。一味迷信计算机会代我们做出正确判断，其实弄不好只是一种类似“计算机算命”。

这种算命方法有时还很灵，因为多参数判别法最终的综合曲线始终是黑的大致占一半，白的又占一半，所以对有油无油的“预报成功率”常常高于50%（因为即使是完全没有道理的乱猜，其预报成功率的统计值也会是接近50%），因此容易被认为效果不错。

此外我请大家注意，“预报成功率”不等于“探井成功率”，它们是两种不同的概念。

当然，我不是反对使用神经网络，神经网络本身是一种很好的工具。我不同意的是把它到处乱用，把人们自己都说不清的事情让机器去做判断。

让我们设想一下，公安局里有许多刑事犯的档案，有他们每人的照片、指纹，还有历次作案的记录。根据某些人脸上的疤痕和一副凶相，这可能与他们的刑事犯罪有着某些联系。那么，如果把他们的档案输入到计算机里去，让神经网络进行“自学习”，学好后到街上去抓坏人，这种做法肯定是不成的，会造成许多冤假错案。这是常识中的事，但具体到找油这个问题上，人们却常常愿意去算一次命。

大概在10年前，我看到科普杂志上的一篇短文，说了这样一个故事：计算机已经发展到比人更聪明了。有一个青年人穷困潦倒，他去求助于一台智能计算机。第一次计算机告诉他，要他第二天上午10点钟到某公园第几条长凳上去。第二天，他准时到达那里，发现一个钱包，于是解决了他的生计问题。后来这个青年再去请教智能计算机，问如何才能发财，计算机就告诉他，次日到赛马场上去买5号马的彩票。他又去了赛马场。那匹马又瘦又不像样子，但他还是相信计算机，把所有的钱都买了5号的票，结果出人意料，那匹马跑了个第一。因此，他又发了一笔财。这青年第三次又到计算机那里去求教，计算机说，今天夜里12点整，到市区某桥的中间向下跳下去。青年真信，那天晚上就从桥上跳下去，结果弄得一身泥水，受伤了，差一点送了命。从医院里出来后，青年去质问智能计算机为什么欺骗他。计算机发出一连串哼哼声，屏幕上只是一连串的问号，它拒不回答。青年人一气之下，把那台智能计算机砸坏了。

我以上讲的这些东西难免有许多片面性，也可能我的表达方式还会影响一部分人对人工智能、神经网络、多参数模糊识别技术研究的积极性。不过我的宗旨是希望大家避免盲目性，多多思考实质性的问题，做到从感性认识上升到理性认识。不要一味迷信计算机能够比人更高明；不要轻信人都不能判断的含油气现象，机器就能做出正确的判断。

我想，即使到了计算机蓬勃发展的明天，机器的作用还将依靠人的智慧来驱动。人应该正确地教会机器如何做，而不是反过来迷信它。

除非将来人们真的把人的思维方式完全总结出来，然后教会计算机按人的思维方式去思维，这样机器可能与人一样聪明，甚至思维还更快。就像美国科幻电影《机器人2号》中那样，有一个智能机器人钻进书店里，他迅速地翻阅各种书本，把知识都立即装进记忆库中去，就变成绝顶聪明的机器人。不过我想这可能再需经过一个世纪才有可能实现。

21世纪，我们主要还是要靠人类自己的大脑来思维，靠大家努力学习来获得知识。

或者将来有一天人们发明了向大脑输入信息的办法，把信息直接灌进人的大脑记忆库中去，那么人的知识就可以很方便地获得了，也不用去上学或者辛苦地去读文章了。到那个时候，考博士学位也没有啥意义了，只要大脑没有毛病，每人都可以当博士。不过这种发明恐怕至少要等到生物学及医学发生了重大的革命性转变之后才能实现。

四、人才成长与精神因素的关系

今天高校的学生(包括研究生),你们所掌握的知识比我们当学生时代可要高得多,这一点我是深信不疑的。我相信你们一定会飞得比我们这一代更高,取得比我们这一代更丰硕的成果。

但是我也看到,有一些大专生到工作岗位上不一定能够把工作做得很漂亮。相反有些中专生在工作岗位上,通过长期的实践考验,很快成为技术骨干。

这里有一个差别,便是学校里恐怕今后还应加强德育教育,敬业精神和奉献精神两个方面很重要。我前面说过的"功夫不负有心人",有心人才能不断长知识。现在有少数青年人满足于得到一个学位,面对他实际从事的工作缺乏求知热情,或者好高骛远,不愿做艰苦细致的工作,因而缺乏实践经验,从而对所研究的对象缺乏"实感",这便会影响他们的锻炼成长。

我的亲身体会是"读了不等于懂了,懂了不等于记住了,记住了不等于能掌握,掌握了不如自己做一遍"。尤其是从学校毕业后,更要善于从实践中提高自己。

此外,干我们石油勘探这一行的要有一种奉献精神。我们的野外作业本身是一种艰苦的劳动,现在野外工作条件比我们过去20世纪50年代的情况和大庆会战时期已经有了不少改善。1961年,我参加了轰轰烈烈的大庆会战。当时全国正是困难时期,粮食严重缺乏。长时间以黄花菜充饥,我得了浮肿病,每天耳鸣不止。但我坚持工作,始终严格要求自己,在艰苦的环境中锻炼自己。对于艰苦的条件我没有任何怨言,心里只有一个念头:只要能使祖国甩掉石油落后的帽子,再苦也干。凭着这种精神,我取得了出色的工作成绩,每年代表地调处在大型技术座谈会上作勘探成果报告,连续三年被评为"五好红旗手"。

我们刚在新疆工作的那个年代里,经常要承受挨冻受饿,风吹日晒,在荒无人烟的地方车坏了,回不了家,当"团长",挨蚊虫叮咬,彻夜难眠。大庆会战的年代里,在−30℃的寒冷冬季里,我们天不亮站在钻机车上迎着朔风去工地,一小时到达后,两脚冻得麻木,好久缓不过来。那时我们不怕苦反而以苦为荣,主要是我们有着一股为报效祖国而劳动的精神支柱。我们那时候是唱着歌去迎接困难的,不怕困难。

我希望现在的年轻人能够加强其敬业精神和奉献精神,这样才能成长为祖国有用的栋材。

我以上讲的意见肯定有许多片面性和错误,因为我不是搞教育的,希望老师们给以批评指正。

谢谢大家。

封面
书名
版权
目录